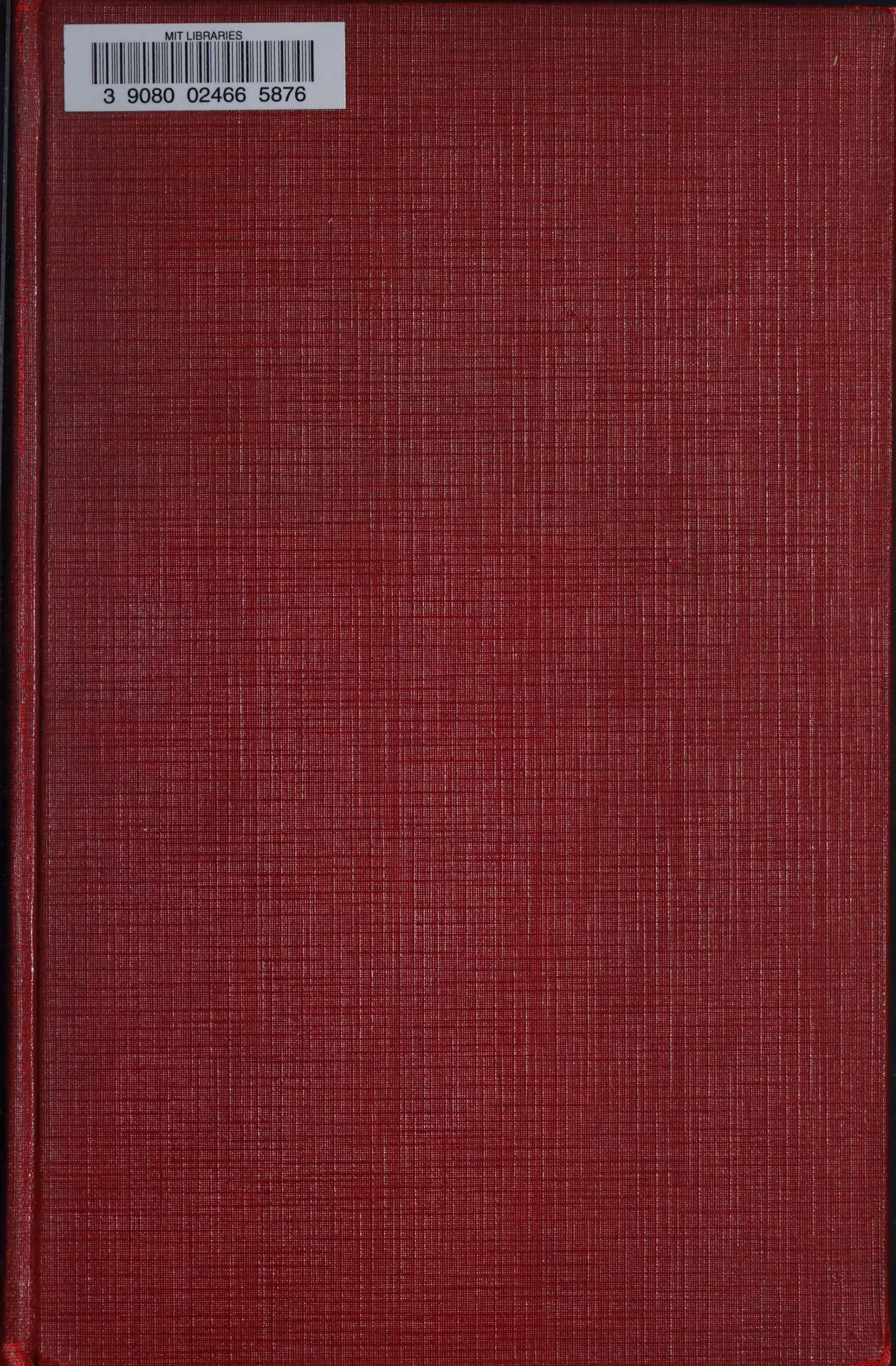

MIT LIBRARIES
3 9080 02466 5876

LAMPES

TUBES & VALVES ÉLECTRIQUES



LAMPES

TUBES & VALVES ÉLECTRIQUES

ÉTUDES DES CARACTÉRISTIQUES
CONSTRUCTION — ESSAIS — USAGES

Applications à l'*Éclairage*, au *Redressement des Courants* et à la *Radiotélégraphie* ou à la *Radiotéléphonie*

Par Hector PÉCHEUX

Docteur ès Sciences physiques
Sous-Directeur de l'École nationale d'Arts et Métiers de Lille
Lauréat de l'Académie des Sciences

Avec 153 figures



PARIS
LIBRAIRIE DELAGRAVE
15, RUE SOUFFLOT, 15

1925

INTRODUCTION

L'éclairage électrique moderne fait appel, presque exclusivement, à la *lampe à incandescence* ; — la *lampe à arc* conservant, cependant, quelques applications industrielles restreintes, mais pour lesquelles elle est particulièrement indiquée.

Nous avons, dans cet ouvrage, entrepris l'étude des lampes telles qu'on les fabrique actuellement ; exposé leurs caractéristiques essentielles (électriques et optiques), leur mode de construction, les essais auxquels on les soumet, et les applications diverses qu'elles reçoivent.

Mais il est indispensable, dans l'état actuel de l'industrie des lampes et de leur application à l'éclairage, de connaître les lois générales du rayonnement, sans lesquelles il devient impossible de bien comprendre les phénomènes dont elles sont le siège, et l'utilisation rationnelle que l'on en doit faire. Nous avons donc fait précéder l'étude des lampes de quelques notions concises, mais suffisantes, pensons-nous, des principes du rayonnement lumineux.

Nous avons particulièrement insisté, ensuite, sur la *lampe à incandescence* et surtout sur la lampe à filament métallique, qui constitue une source de lumière économique, principalement en atmosphère gazeuse inerte, — en exposant tout ce qui doit être connu actuellement de ses caractéristiques électriques et optiques : nous avons montré comment on construit ce type de lampe, comment on l'étalonne, et indiqué les moyens de déterminer l'intensité lumineuse, le flux lumineux, et l'éclairement qu'elle peut fournir ; nous en avons donné, ensuite, les principales applications industrielles, en insistant d'une façon spéciale sur son emploi rationnel pour l'éclairage des habitations, des bureaux, des ateliers, des voies publiques ; — nous avons établi des projets d'installation d'éclairage avec ce genre de foyer lumineux.

La *lampe à arc*, bien que d'un maniement plus compliqué, exigeant des soins spéciaux qui la rendent moins pratique, parce que moins économique, reçoit encore aujourd'hui des applications spéciales, pour les appareils de projections, les phares, et certains usages industriels ; nous avons porté notre attention sur ses caractéristiques, la détermi-

nation du flux lumineux qu'elle produit, et les usages auxquels elle demeure particulièrement destinée.

Les *tubes luminescents* occupent aujourd'hui une place importante dans l'industrie de l'éclairage (tubes à vapeur de mercure, tubes à néon); — les *tubes à vide* sont utilisés pour la production des rayons X, et leur importance ne doit échapper à quiconque s'intéresse à la Radiographie et à la Radiométallurgie. Nous avons donc décrit ces tubes aussi complètement qu'il nous a été possible de le faire, et signalé avec leurs caractéristiques propres, leurs applications industrielles diverses.

Enfin, sous le nom de *Valves électriques*, nous avons décrit toute une catégorie de tubes (à vide, ou renfermant un gaz inerte ou une vapeur de mercure) employés, par la nature même de leur fonctionnement, à redresser les courants alternatifs, et à la transmission ou à la réception des ondes de télégraphie ou de téléphonie sans fil.

Nous pensons que cet ouvrage pourra rendre des services à tous ceux, — industriels, ingénieurs, abonnés aux secteurs d'éclairage électrique, — qui emploient ces catégories d'appareils aux divers usages que nous venons de signaler.

Nous tenons à remercier la *Cie des lampes-métal* ; la *Cie lorraine des charbons et lampes et appareils électriques* ; la *Société de la lampe Philips*, qui ont bien voulu mettre à notre disposition, pour nos essais, un certain nombre de lampes ou valves électriques.

En dehors de nos documents personnels, résultant de travaux poursuivis depuis de longues années sur les lampes électriques, — travaux originaux que nous avons publiés en leur temps, principalement dans la *Revue générale de l'Electricité*, — nous avons puisé dans un certain nombre d'ouvrages, ou de notes particulières, que la Bibliographie, insérée à la fin du livre, mentionne comme il convient ; — des figures assez nombreuses illustrent notre texte, et permettent de suivre facilement l'exposé des diverses questions que nous avons traitées.

HECTOR PÉCHEUX.

30 septembre 1924.

LAMPES, TUBES ET VALVES ÉLECTRIQUES

---

1. **Définitions.** — Nous désignerons, sous le nom de *lampes électriques*, des appareils servant à l'*éclairage*, et fondés sur le phénomène de l'*incandescence* ou de l'*arc* (que nous définirons plus loin); par *tubes électriques*, nous entendrons des appareils fondés sur le phénomène de l'*électroluminescence;* quelques-uns peuvent servir à l'*éclairage*; d'autres reçoivent des applications différentes (*rayons X*); enfin, sous le nom de *valves électriques*, nous comprendrons tous les dispositifs (lampes ou tubes) servant à redresser les courants : c'est-à-dire ne laissant passer qu'une demi-onde (toujours de *même sens*) d'un courant alternatif ou oscillant ; ces derniers appareils servant, les uns à redresser les courants alternatifs, les autres à la réception des ondes radiotélégraphiques ou radiotéléphoniques.

N. B. — Nous verrons, plus loin, que les lampes électriques (à incandescence, à arc) sont des *transformateurs indirects* d'énergie *électrique* en *énergie lumineuse* (par la forme intermédiaire d'*énergie calorifique*) ; tandis que les tubes à *électroluminescence* sont des *transformateurs directs d'énergie électrique* en *énergie lumineuse.*

Avant d'étudier ces diverses catégories d'appareils, nous allons exposer quelques *principes fondamentaux*, relatifs au *rayonnement*, à l'*incandescence*, à l'*arc*, et à la *luminescence*, qui nous aideront à comprendre la *construction* et l'*utilisation* des lampes, tubes et valves.

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES FONDAMENTAUX SUR LE RAYONNEMENT, L'INCANDESCENCE, L'ARC ET LA LUMINESCENCE

A. — PRINCIPES DU RAYONNEMENT

L'énergie émise par une source de lumière se propage, dans le milieu qui l'entoure, et que nous supposerons homogène et transparent, suivant des *rayons rectilignes ;* ceci, avec une vitesse constante V égale à 3×10^{10} centimètres-seconde dans le vide.

2. *a*) **Radiations, fréquence; longueur d'onde.** — Il existe deux sortes de radiations lumineuses, les radiations *blanches* (celles du soleil), et les radiations *monochromatiques* que fournit un spectroscope intercalé sur le trajet d'un faisceau de lumière blanche ; l'ensemble des radiations fournies par le spectroscope constitue le *spectre ;* chacune de ces radiations a une *période* propre, de durée T, et de *fréquence* $f = \frac{1}{T}$, bien déterminées.

Dans la lumière blanche, chaque radiation monochromatique existe donc, indépendamment des autres, et se comportant comme si elle était seule (principe de l'indépendance des rayons monochromatiques); toutes possèdent *la même vitesse* définie plus loin, donc celle de la lumière blanche.

La *longueur d'onde,* dans le vide, de chaque radiation est liée à la vitesse V, et à la fréquence f par les relations connues ; (1) $\lambda = VT = \frac{V}{f}$.

Quand une radiation monochromatique pénètre dans un *milieu transparent* dont l'indice de réfraction est n pour cette radiation, sa vitesse de propagation est : $\frac{V}{n}$, et sa longueur d'onde : $\frac{\lambda}{n}$.

Les longueurs d'onde qui caractérisent les radiations monochromatiques sont toujours supposées exprimées dans le vide ; mais celles que

l'on mesure dans l'air sec à 15° centigrades et sous la pression normale de 76 c/m de mercure se rapprochent très sensiblement des premières.

Dans le spectre de la lumière blanche, comprenant l'*ultra-violet* (spectre chimique, c'est-à-dire réduisant les sels d'argent), le *spectre visible* (s'étendant de la radiation violette à la radiation rouge en passant par les radiations : indigo, bleue, verte, jaune, orangée), et le spectre *infrà-rouge* (spectre calorifique), les longueurs d'ondes varient, dans le même ordre, d'une valeur inférieure à 0 micron 4 (le micron vaut $\frac{1}{1.000}$ de millimètre), à une valeur supérieure à 0 micron 8 (on écrit : $0\mu8$).

La radiation violette donne : $\lambda = 0\mu4$; la radiation rouge : $0\mu8$.

3. *b*) **Réflexion, réfraction, diffusion.** — Si une radiation lumineuse monochromatique SI tombe sur une surface parfaitement *polie* MM', elle change de direction ; le rayon réfléchi (direction nouvelle) IR fait avec la normale à la surface réfléchissante, au point d'incidence I, un angle (dit de réflexion *r*) égal à l'angle *i* que fait avec la même normale, le rayon incident (celui de la 1re direction), ces 2 rayons étant dans le même plan avec la normale IN.

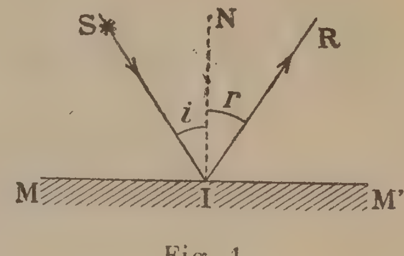


Fig. 1.

On obtient ce résultat avec une surface polie argentée, ou avec une surface polie métallique (miroirs) ; (fig. 1).

Si la radiation tombe sur une surface *mate* PQ (feuille de papier, par exemple, ou surface plane recouverte de chaux, ou de céruse), il y a réflexion *dans toutes les directions* IR, IR_1 IR_2. etc... (fig. 2) : c'est la *diffusion*. L'énergie réfléchie est toujours une fraction de l'énergie incidente ; on donne à cette fraction d'énergie, le nom de *pouvoir réflecteur* de la surface réfléchissante pour la radiation en question. Quelquefois, toute l'énergie de la radiation incidente se retrouve dans les *radiations diffusées* : la surface est dite parfaitement diffusante. La *réfraction* d'une radiation monochromatique se produit quand celle-ci passe d'un milieu dans un autre de densité différente : de l'air dans l'eau, de l'air dans le verre ; il y a changement de direction de la radiation, le rayon réfracté se rapprochant de la normale quand l'*indice* de *réfraction* : *n*, du 2e milieu par rapport au premier, est > 1; il s'en écarte, au contraire, si : $n < 1$. Chaque radiation monochromatique se comportant comme si elle était seule dans la lumière blanche ; — ceci explique pourquoi la lumière blanche est décomposée par le

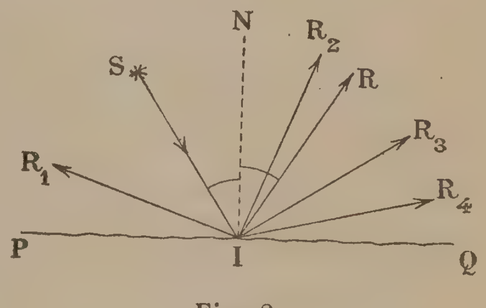


Fig. 2.

prisme ; puisque l'indice de réfraction *n'est pas le même* d'une radiation à une autre, et qu'il *croît* du rouge au violet.

4. *c*) **Pouvoir émissif, pouvoir absorbant.** — Considérons la surface d'un corps émettant un rayonnement lumineux monochromatique dans une direction perpendiculaire à cette surface. Si nous admettons qu'un très petit élément *ds* de cette surface émet, par seconde, de l'énergie due à une lumière monochromatique de longueur d'onde λ, dans un cône ayant pour sommet le centre de l'élément *ds*, et pour axe la direction d'émission AZ, ce cône découpant une surface $d\omega$ dans la sphère de rayon 1, ayant pour centre le sommet du cône ($d\omega$ est ce que l'on nomme l'*angle solide* du cône), on peut écrire pour l'énergie élémentaire *dw* ainsi *émise par seconde* (fig. 3) :

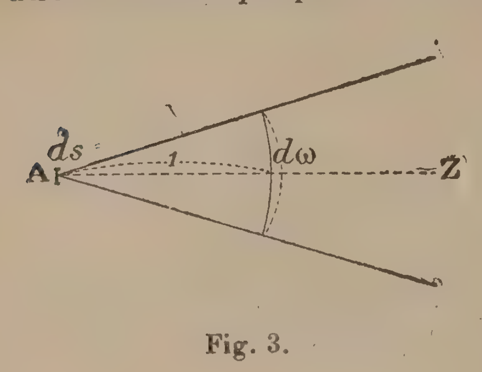


Fig. 3.

(2) $dw = e.\ ds.\ d\omega.\ d\lambda$; elle est *proportionnelle* à la surface émettante, à l'angle solide du cône ; et le coefficient de proportionnalité *e* porte le nom de *pouvoir émissif* de la surface, pour la direction en question, et pour la longueur d'onde λ.

Si la direction de l'émission fait un angle α avec la normale à la surface *ds* l'énergie émise vaut : $dw' = dw.\ \text{Cos}\ \alpha$. Pour obtenir l'énergie totale émise dans le cône considéré, pour la même longueur d'onde, il suffira d'ajouter deux expressions telles que (2), pour deux plans de polarisation rectangulaires quelconques.

N.B. — La formule (2) s'applique à la lumière polarisée, dont le plan passe par l'axe du cône, qui est la direction de l'émission.

Si, sur la surface *ds* du corps en question, arrivent des radiations *identiques* aux précédentes (de même longueur d'onde, de même plan de polarisation), mais se dirigeant en *sens contraire*, une portion de l'*énergie incidente* sera réfléchie, ou diffusée; une autre portion, après avoir traversé la surface, sera transmise par elle ; mais il y en aura une 3° qui sera *absorbée* ; le pouvoir absorbant du corps sera le rapport de l'*énergie absorbée* à l'énergie incidente ; nous le désignerons par *a*, pour la direction et la longueur d'onde définies précédemment ; *a* ne dépend pas de la *quantité* d'énergie incidente par seconde ; c'est un nombre toujours inférieur à l'unité.

5. *d*) **Spectres continus, spectres discontinus.** — Les spectres *continus* sont ceux pour lesquels la puissance rayonnée est *fonction continue* de la longueur d'onde ; ils sont fournis par les *solides ou les liquides incandescents* ; ils sont dus aux mouvements désordonnés des *électrons* produits par le choc des molécules de ces corps.

Les spectres *discontinus* sont des spectres de *raies* ou de *bandes*, nettement distinctes; les longueurs d'ondes de ces raies ou bandes sont *constantes* pour chaque corps. Ces spectres sont fournis par les gaz non comprimés, ou certaines solutions salines ; ils sont dus aux mouvements *réguliers* des électrons à l'intérieur de l'atome de chaque corps, mouvements ayant des *périodes propres*.

6. *e*) **Diverses sortes de rayonnements.** — Il existe deux catégories de rayonnements, pour les corps susceptibles d'émettre de l'énergie lumineuse :

α) le rayonnement *par incandescence* est celui que donne un corps dont l'état dépend exclusivement de sa *température* (cas d'un *fil métallique* chauffé *au rouge*) ; un tel corps peut simplement perdre ou gagner de la chaleur, il n'éprouve donc que des variations d'*énergie thermique*. L'énergie que rayonne un *corps incandescent* est due uniquement à la quantité de chaleur qu'il possède ; celle qu'il absorbe est exclusivement transformée en chaleur, qui se transformera à son tour en énergie rayonnée. Le pouvoir émissif *e* et le pouvoir absorbant *a* pour un point donné de la surface rayonnante, et pour la longueur d'onde de la radiation émise on absorbée, sont des fonctions de la *température* du corps incandescent, et ne dépendent aucunement de la nature ni de la température des corps qui l'entourent; à température constante, il rayonne indéfiniment sans modifications et de la même manière.

β) le rayonnement par *luminescence* a une origine différente; sa source est de l'énergie *chimique*, de l'énergie *lumineuse*, ou de l'énergie *électrique* (l'oxydation lente du phosphore est productrice d'un rayonnement par luminescence; l'absorption d'énergie lumineuse solaire par le sulfure de baryum, permet à celui-ci de rayonner à son tour de l'énergie lumineuse dans l'obscurité; les décharges électriques dans les gaz raréfiés, sous certaines conditions à établir, rendent ceux-ci luminescents); le corps qui rayonne par luminescence éprouve une modification du fait de son rayonnement.

N. B. — Nous n'examinerons que la luminescence due à une source d'énergie électrique, c'est-à-dire l'*électroluminescence*.

7. *f*) **Emission électronique (par incandescence).** — Nous verrons plus loin, lors de l'étude du rayonnement d'un filament incandescent (Chap. II ; Lampes électriques à incandescence), qu'un tel filament, au rouge, émet des *électrons négatifs*, à condition que le vide qui l'entoure soit suffisamment poussé. L'émission de ces électrons est d'autant plus grande que la température du filament est plus élevée : elle est plus grande au rouge blanc qu'au rouge vif. Si l'on dispose le filament émetteur d'électrons dans un champ électromagnétique de potentiel donné, les électrons négatifs libérés sont dirigés, et peuvent fournir un *courant électronique* dont nous verrons des applications en radiotélé-

graphie et en radiotéléphonie. Nous reviendrons plus longuement sur ce phénomène, quand nous aurons étudié au préalable la lampe à incandescence dans le vide.

8. *g*) **Relation entre les pouvoirs émissif et absorbant** (LOI DE KIRCHHOFF). — Si l'on considère une même petite surface, une même radiation monochromatique (longueur d'onde donnée), et une même direction d'émission, on peut énoncer la loi suivante de Kirchhoff :

« A une même température, et dans un même milieu, le rapport $\frac{e}{a}$ est constant pour tous les corps ; il est égal à l'intensité spécifique, dans ce milieu, du rayonnement de la longueur d'onde considérée ».

Si E est cette *intensité spécifique du rayonnement*, on a donc :

$$\frac{e}{a} = E. \quad (3)$$

Pour vérifier cette loi, on considère dans une enceinte fermée à température constante, imperméable au rayonnement et remplie d'un milieu homogène et isotrope, un corps quelconque; quand l'équilibre de température est atteint entre le corps et l'enceinte, l'énergie absorbée par le corps pendant une seconde est constamment égale à celle qu'il émet, puisque la température demeure constante. En écrivant algébriquement l'égalité des énergies absorbée et émise par seconde, à l'aide de formules analogues à la formule (2), on obtient aisément la relation (3) ; nous n'établirons pas cette formule, que nous nous contenterons de retenir, et d'appliquer à divers cas.

9. *h*) **Corps noir.** — On donne *conventionnellement* ce nom à tout corps dont le pouvoir absorbant est constamment égal à 1 (il est parfaitement absorbant pour toutes les longueurs d'onde); on en déduit, avec la formule (3) :

$e = E$: le pouvoir émissif est égal à l'intensité spécifique du milieu.

Or, l'intensité spécifique du milieu est indépendante du plan de polarisation, et aussi de la direction du rayonnement, mais elle est proportionnelle au carré de l'indice absolu de ce milieu (dans lequel se produit le rayonnement) ; il résulte de tout ceci que : le pouvoir émissif du corps noir est *le même* pour toutes les directions; son rayonnement n'est pas polarisé, c'est donc de la *lumière naturelle*. L'aspect d'un tel corps S lorsqu'il est à une température suffisamment élevée pour émettre de la *lumière visible* et lorsqu'on l'observe à travers un trou α percé dans un écran E, est *invariable* ; s'il est *sphérique*, il apparaît comme un *disque plat* (fig. 4).

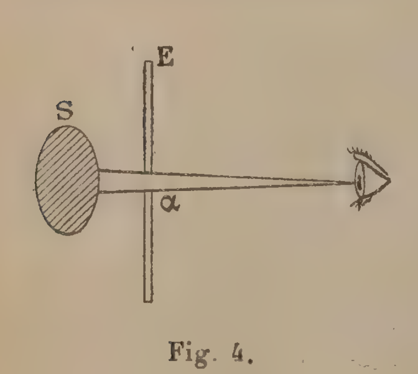


Fig. 4.

Pour réaliser *pratiquement* le corps noir, — c'est-à-dire le corps *parfaitement absorbant*, qui n'existe pas en réalité, mais dont on peut s'approcher beaucoup — il suffit d'enduire une surface quelconque d'une couche assez épaisse de *noir de fumée* ou de *noir de platine* ; mais une telle surface ne se rapproche du corps noir que pour les radiations visibles et les radiations voisines du spectre visible ; pour les radiations à grande longueur d'onde, le noir de fumée présentant un pouvoir réflecteur appréciable, il n'en est plus de même.

On obtient une réalisation plus parfaite du corps noir, comme le fit *Lummer*, en employant une *enceinte fermée opaque*, à ouverture très petite, et maintenue à température constante ; le rayonnement, dans une telle enceinte, est très sensiblement le même que si cette enceinte était totalement fermée, et celui qui sort par le petit orifice est identique à celui qui serait émis, à la même température, par un corps noir parfait. L'enceinte adoptée par Lummer était un cylindre réfractaire à double paroi, chauffé par un cylindre de platine disposé entre les deux parois et parcouru, selon son axe, par un courant électrique le portant au rouge. L'ouverture était percée sur l'une des bases du cylindre intérieur.

N.B. — Nous comparerons, un peu plus loin, le rayonnement du corps noir à celui du carbone et des métaux employés dans les lampes à incandescence.

10. *i*) **Loi de Stefan-Boltzmann.** — En appliquant les lois de la thermodynamique au rayonnement du corps noir, on peut énoncer la loi suivante découverte empiriquement par Stéfan, et vérifiée par Boltzmann :

« L'énergie relative à toutes les longueurs d'onde (donc à toutes les radiations de fréquences différentes) et rayonnée par seconde par un corps noir pour un angle solide donné, et une surface d'émission donnée normale à la direction du rayonnement, est proportionnelle à la 4e puissance de la température absolue. »

Si l'on exprime l'énergie totale w rayonnée par seconde, dans toutes les directions, par un centimètre carré de surface du corps noir, on obtient la relation suivante qui traduit la loi de Stéfan (4) : $w = \pi K T^4$; T, étant la température absolue du corps noir ; et K une constante ; π est le rapport connu : 3,1416. On a : $K = 1,7 \times 10^{-5}$ (Kurlbaum).

11. *j*) **Applications de la loi de Stéfan.** — Si l'on soumet, au rayonnement du corps noir, à T°, l'unité de surface d'un autre corps noir à $t°$ (températures absolues), l'angle solide du cône d'émission étant égal à 1, l'énergie reçue par seconde, par cette surface, sera :

(5) $W = K(T^4 - t^4)$; K étant un coefficient qui dépend de l'appareil de réception — la même constante que dans la formule (4).

Si $t \leqq 50°$ centigrades, et $T \geqq 650°$ centigrades (ou, ce qui revient au même, si : $t \leqq 323°$ absolus ; et $T \geqq 923°$ absolus), le terme en t^4 tend à

être négligeable devant T^4. Ainsi, si le corps récepteur est à la température ordinaire (à 20° centigrades), on a : $t = 293°$ (absolus) ; d'où (par logarithmes) : $t^4 = 737 \times 10^7$; avec $T = 923°$ (absolus), on trouve : $T^4 = 725,77 \times 10^9$; dès lors t^4 est de l'ordre des centièmes vis-à-vis de T^4 ; *a fortiori*, si T atteint et dépasse 800° centigrades (cas usuels). Dans ces conditions, la loi de Stéfan-Boltzmann se ramène à : (5') $W = KT^4$.

D'après les nombreuses recherches (de Todd, Féry et Drecq, Kurlbaum, Bauer et Moulin), on a : $K = 2 \times 10^{-5}$, en moyenne (dans le système C.G.S. : centimètre carré ; erg-seconde ; degré centigrade).

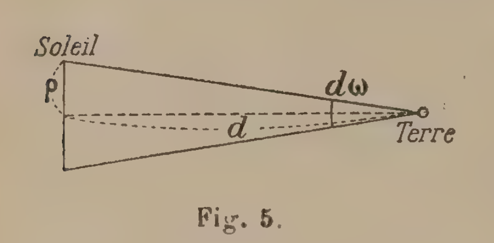


Fig. 5.

1° Si l'on considère le *Soleil* comme un *corps noir*, on peut calculer sa température absolue à l'aide de la formule (5'), après avoir évalué au préalable l'énergie qu'il envoie par seconde à 1 cm² de la Terre. On a, pour cette énergie, l'angle solide du Soleil vu de la Terre (fig. 5) étant : $d\omega = \pi \frac{\rho^2}{d^2}$ (ρ = rayon du disque solaire ; d = distance de la Terre au Soleil) $W' = Wd\omega = KT^4 \times \frac{\pi\rho^2}{d^2} = K\pi \frac{\rho^2}{d^2} T^4$. On a : $K\pi = 2 \times 10^{-5} \times 3,14 = 6,28 \times 10^{-5}$; or, $\frac{2\rho}{d}$ est le diamètre apparent du Soleil = 32 minutes, ou : $9,3 \times 10^{-3}$ *radians* ; d'où $\frac{\rho}{d} = 4,65 \times 10^{-3}$; $\frac{\rho^2}{d^2} = 21,6 \times 10^{-6}$; d'où, en effectuant : $W' = 6,28 \times 10^{-5} \times 21,6 \times 10^{-6} \times T^4 = T^4 \times 135,65 \times 10^{-11}$. L'énergie W' calculée par d'autres méthodes fournit un nombre très voisin de $1,5 \times 10^6$ ergs seconde ; d'où : $T^4 = \frac{1,5 \times 10^6}{135,65 \times 10^{-11}} = 1,105 \times 10^{15}$. — Calculée par logarithmes, la température absolue T vaut ainsi : $T = 5766°$; ou, en *degrés centigrades* : 5493° : il est bien entendu que c'est là la température d'un *corps noir* mis à *la place du soleil* ; mais le *pouvoir émissif* du soleil est plus grand au centre qu'au bord, et il dépend de la direction des radiations ; dès lors, sa température vraie est un peu différente du nombre précédent.

2° La loi de Stéfan permet encore d'évaluer les hautes températures quand le corps soumis à l'essai est un *corps noir* : telle l'ouverture d'un four ; on emploie à cet effet la lunette pyrométrique de Ch. Féry, que nous ne pouvons décrire ici, — cette sorte de mesure ne rentrant pas dans le cadre de cet ouvrage — et qui donne les températures, à 10° près, d'un four, d'une flamme, d'un métal incandescent (1).

12. *k*) **Loi de Wien.** — Si l'on représente, en fonction de la longueur d'onde λ, l'intensité spécifique du rayonnement (énergie émise par

(1) Voyez : *Essais des Métaux et alliages* (H. Pécheux ; J.-B. Baillière et fils, Editeurs, Paris)

unité de surface, dans un angle solide égal à 1) : E, on constate, en faisant varier la température absolue T :

1° que chaque courbe passe par un maximum E_m pour une certaine longueur d'onde λ_m; 2° que si b et c sont 2 constantes, l'on a pour un *corps noir* (c'est la *loi de Wien*) :

(6) $\begin{cases} \lambda_m \times T = b; \\ E_m = c \times T^5; \end{cases}$ les longueurs d'onde λ sont exprimées en *microns*; la constante b vaut alors 2940 (Lummer et Pringsheim); la figure 6 montre que les courbes s'élèvent quand la température du corps noir s'élève; le maximum E_m se déplaçant vers les plus courtes longueurs d'onde (ultra-violet, pour lequel : $\lambda \leq 0\mu 4$); donc, quand on chauffe progressivement un corps noir, il émet des radiation où domine l'infra-rouge ($\lambda > 0\mu,8$); le rouge apparaît ensuite; le violet ($\lambda = 0\mu 4$) apparaît plus tard.

On voit que, dans le rouge, l'énergie de rayonnement (E) croît très vite avec la température : on peut déduire la température du corps noir de son pouvoir émissif dans le rouge ($e = E$, pour le corps noir); le *pyromètre optique de H. Le Châtelier* utilise cette remarque pour déterminer la température des corps incandescents au rouge, tels les filaments des lampes à incandescence : nous reviendrons sur cet *appareil* plus loin (*température* du *filament des lampes*).

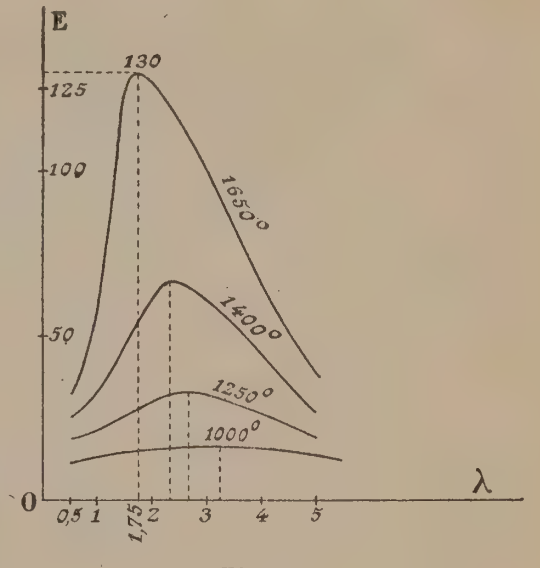


Fig. 6.

On peut, à l'aide des courbes de la fig. 6, obtenir la température du soleil, correspondant à λ'_m (longueur d'onde de la radiation fournissant le maximum de l'énergie qu'il nous envoie). Dans le spectre solaire, on a : $\lambda'_m = 0\mu 5$; pour avoir la courbe correspondante (qui fournira la température absolue x cherchée), on pose (d'après la *loi de Wien*) en partant de $\lambda_m = 1,75$, fournie par la courbe de 1650°, pour la longueur d'onde de maxima : $\lambda'_m = 0\mu,5$ du spectre solaire (considéré comme celui d'un corps noir) :

$$\lambda'_m = 0,5 = \lambda_m \times \frac{1.650°}{x} = 1,75 \times \frac{1.650}{x};$$

d'où $$x = \frac{1,75 \times 1.650}{0,5} = 5.775° \text{ (absolus)};$$

d'où : en degrés centigrades : $5775 - 273 = 5502°$ (ce qui correspond assez bien au nombre 5493° que donne la loi de *Stéfan*).

N. B. — La constante b vaudrait alors, dans ce cas : 2890 (au lieu de 2940, pour un corps parfaitement noir).

B. — RAYONNEMENT PAR INCANDESCENCE

[*Solides* (*charbon, métaux et oxydes*); *gaz, vapeurs*]

Nous allons comparer, dès maintenant, le rayonnement des solides, celui des gaz et des vapeurs, (corps non noirs), au rayonnement des corps noirs.

13. *a*) **Remarque générale.** — Nous avons vu que, pour un *corps non noir* (c'est-à-dire dont le pouvoir absorbant a est < 1), il vient : $e = a\text{E}$ (formule 3 ; § 8. g) d'où : $e < \text{E}$; dès lors, comme on a pour le corps noir : $e = \text{E}$ (§ 9. h), il s'ensuit que, « de tous les corps à la même température, c'est le corps noir qui a le plus grand pouvoir émissif. »

Quand on échauffe le corps noir, il nous donne une sensation de lumière lorsque sa température atteint 500° centigrades (d'après Draper) : c'est le *rouge-sombre*. Mais, avant le rouge-sombre, il se produit une sensation *grise* de vision défectueuse. Voici comment Lummer explique ce phénomène : la rétine est pourvue de 2 sortes d'éléments nerveux sensibles : les *cônes*, et les *bâtonnets*; les cônes sont sensibles aux visions colorées bien éclairées; les bâtonnets fournissent une vision grise pour de faibles éclairements. Donc, quand l'incandescence commence, — incandescence grise, — le centre de la *tache jaune* de la rétine (où se fait l'image d'un objet) possédant surtout des cônes, sans bâtonnets, par suite la sensation de la vision commence à l'extérieur de ce centre.

La température continuant à s'élever, l'incandescence rouge-sombre apparaît et les cônes sont alors impressionnés. Le rouge-cerise apparaît vers 800° centigrades, le rouge-jaune vers 1050°, le jaune à 1200°, le blanc à 1300°, et le blanc vif à 1500°.

La relation : $e < \text{E}$ montre bien « qu'aucun corps ne peut paraître lumineux à une température inférieure à celle du corps noir ». Un corps qui a un pouvoir absorbant faible paraît lumineux plus tard qu'un corps dont le pouvoir absorbant est plus élevé. Les *métaux polis*, à température égale, paraissent moins lumineux que le noir de fumée.

14. *b*) **Variations du pouvoir émissif avec le pouvoir réflecteur.** — Soit un corps opaque à *surface polie* de pouvoir réflecteur ρ (pour une longueur d'onde λ) ; si nous convenons que l'énergie du rayon incident est l'*unité*, le pouvoir absorbant du corps sera : $a = 1 - \rho$; et la formule (3) devient dans ce cas :

$$(3') \qquad e = (1 - \rho)\text{E}.$$

Or, quand l'incidence augmente sur les surfaces polies, ρ augmente, donc e doit diminuer : on le constate en examinant divers points de la surface à l'aide d'un écran percé d'un trou : l'aspect varie selon les

points examinés. Pour une *surface mate*, presque parfaitement diffusante (feuille de papier blanc, par exemple), le pouvoir émissif est indépendant de la direction d'incidence ; c'est aussi le cas de la porcelaine dépolie, du verre dépoli recouvert d'une couche de lait séché (écrans photométriques).

15. *c*) **Corps gris (Carbone) ; Corps colorés.** — 1° Pour un *corps gris*, le pouvoir absorbant a est très sensiblement le même pour toutes les longueurs d'onde du spectre. Dès lors si l'on veut représenter par une courbe son pouvoir émissif : $e = aE = E \times$ une constante < 1, les ordonnées de la courbe du corps noir (fig. 6) seront réduites dans le même rapport pour donner les pouvoirs émissifs correspondant aux diverses longueurs d'onde; ceci pour la *même température*; la fig. 7 montre la courbe des pouvoirs émissifs d'un *corps gris*, les ordonnées sont plus petites que celles de E du corps noir; la longueur d'onde correspondant à E_m (corps noir) sera la même qui correspondra au pouvoir émissif maximum : e (corps gris).

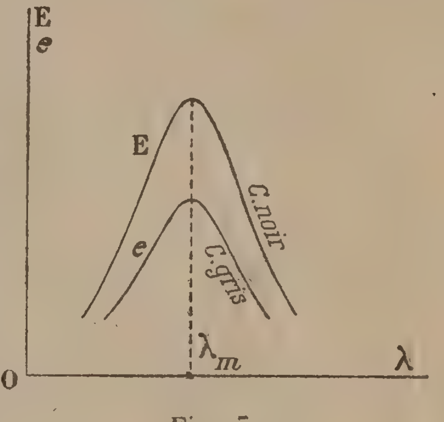


Fig. 7.

Ce cas est celui du *carbone* (employé dans les lampes à incandescence à filament de carbone, dont nous parlerons); ce n'est pas un corps noir, puisqu'il a un pouvoir réflecteur, assez faible il est vrai; mais son pouvoir absorbant est le même pour toutes les longueurs d'onde ; donc son pouvoir émissif est, pour toutes les longueurs d'onde également, proportionnel à celui du corps noir.

La puissance rayonnée, dans toutes les directions, par un centimètre carré d'un filament de carbone de lampe à incandescence (carbone graphité) est, comme pour le corps noir, proportionnelle à la 4e puissance de la température absolue :

$$(4') \quad w = \pi K' T^4 \text{ ; mais } K' < K \text{ (du corps noir);}$$

2° Pour un *corps coloré*, nous avons vu que a varie avec la longueur d'onde ; la courbe de son pouvoir émissif, déduite de celle du corps noir, sera donc *déformée* et tout entière au-dessous de celle du corps noir.

16. *d*) **Pouvoirs émissifs des métaux.** — Les métaux qui nous intéressent sont ceux qui servent dans la construction des lampes à incandescence : osmium, tungstène; et ceux qui étaient utilisés dans les anciennes lampes (platine, tantale). Les courbes de leurs pouvoirs émissifs ont l'allure de celle du corps noir. On peut donc leur appliquer des formules analogues (de Stéfan, et de Wien).

1° La puissance rayonnée, dans toutes les directions, par un centi-

mètre carré de chacun de ces métaux, est proportionnelle à une puissance n^e de la température absolue; — (elle est inférieure à celle que donne le corps noir); on peut l'exprimer ainsi :

$$(7) \qquad w = \pi A' T^n \text{; où } n > 4.$$

2° Le produit de la longueur d'onde λ'_m correspondant au maximum de e, par la température absolue T est encore constant et l'on pose :

(8) $\lambda'_m \times T = b'$; où : $b' < 2.940$ (valeur de la constante b dans le cas du corps noir).

Il résulte de tout ceci que, pour le tungstène, l'osmium, et le platine, le maximum de la courbe de e est déplacé vers les plus petites longueurs d'onde (fig. 8).

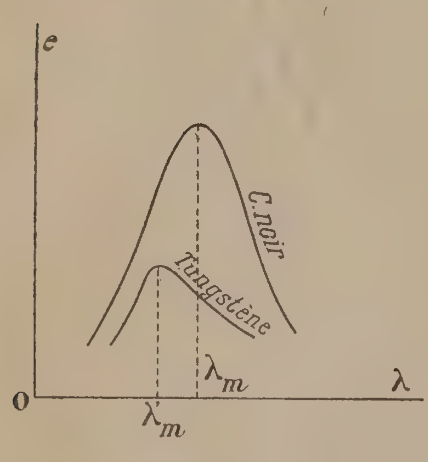


Fig. 8.

En réalité, le produit $\lambda'_m \times T$ augmente un peu avec la température absolue, tout en restant toujours inférieur à celui du corps noir. Pour le *tantale*, qui fait exception, il arrive à dépasser $b = 2940$, aux températures élevées ; et le maximum de la courbe du tantale est alors déplacé vers les grandes longueurs d'onde.

Les valeurs de n ont été trouvées, expérimentalement, égales à : 6 (*tungstène*; c'est la plus élevée) par Hyde ; pour l'*osmium*, à 4,7 (Baker); pour le *tantale*, à 4,7 également (Baker); enfin, pour le *platine*, à 4,6 (Ch. Féry et Cheneveau); c'est le tungstène qui, à température égale, a le plus grand pouvoir émissif; ceci explique l'avantage présenté par ce métal dans la fabrication des lampes à incandescence.

17. *e*) **Pouvoirs émissifs des oxydes rares.** — Les oxydes de thorium, de cérium (du manchon Auer), ont des pouvoirs absorbants qui varient beaucoup avec la longueur d'onde (ils présentent des bandes d'absorption dans le spectre); par incandescence, ils fournissent un spectre montrant des bandes brillantes sur fond continu, comme le révèle le spectroscope, et en relation avec les bandes d'absorption fournies par transparence (quand on les a dissous au préalable dans une perle *froide* de borax).

L'oxyde de thorium donne un spectre où la partie visible est faiblemais où les radiations infra-rouges (à grande longueur d'onde) sont abondantes ; l'oxyde de cérium donne un spectre abondant, dans toute son étendue ; en l'ajoutant au précédent, on obtient une bande d'absorption dans le bleu, où l'émission est intense, sans être modifiée dans le reste du spectre.

18. *f*) **Emission des gaz et des vapeurs.** — Quelques gaz ou vapeurs, — dont nous aurons à parler plus loin, — donnent lieu à des émissions thermiques intéressantes.

Le *gaz carbonique,* chauffé dans un tube scellé, fournit un spectre infra-rouge avec une bande de longueur d'onde : $\lambda = 4 \mu 3$.

La *vapeur de sodium* (le métal est disposé dans un tube à parois résistantes où le vide a été très poussé, et chauffé électriquement) de grande densité, donne un spectre continu (comme les solides incandescents) ; en diminuant la densité, on fait apparaître les bandes.

C. — RAYONNEMENT PAR LUMINESCENCE ; ÉTINCELLE ; ARC ÉLECTRIQUE

Nous ne nous occuperons que de l'*électroluminescence,* qui intervient dans les tubes électriques dont nous parlerons plus loin.

19. *a*) **Electroluminescence ; décharge dans les gaz raréfiés.** — L'électroluminescence est due au passage de la décharge électrique à travers un gaz raréfié (donc sous très faible pression, — quelques dixièmes de millimètre de mercure), ainsi que dans l'étincelle, ou l'arc électriques.

Le gaz est renfermé dans un *tube de Geissler* (tube à 2 ampoules larges munies chacune d'une électrode en platine, et reliées par un tube aminci); c'est dans la partie tubulaire que se produit l'émission lumineuse la plus intense, si la différence de potentiel appliquée aux électrodes est suffisante (fig. 9). On excite généralement le tube à l'aide des courants alternatifs secondaires d'une bobine de Ruhmkorff ; bien que le sens de la décharge varie périodiquement à travers le tube, la luminescence autour des électrodes n'est pas la même ; on obtient en A, une *sphère lumineuse* rougeâtre, autour de l'extrémité de l'électrode ; c'est l'anode (elle correspond à la décharge du *courant direct*) ; en B, on a une gaine lumineuse violacée moins brillante ; c'est la cathode (elle correspond à la décharge du *courant inverse*) , il n'y a pas de luminescence entre ces électrodes et le reste du tube ; seule la région tubulaire présente une luminosité discontinue (stratifiée).



Fig. 9.

N.B. — Nous savons que le *tube de Geissler,* en raison de l'aspect que présentent ses deux électrodes, permet de mettre en place les *tubes de Crookes* sur le circuit de décharge d'un transformateur.

Pour constater que c'est un phénomène de luminescence, — et non thermique, — qui se produit dans ces tubes, Ladenburg faisait fonctionner 2 tubes semblables, renfermant de l'hydrogène, et traversés par

les mêmes décharges électriques; la lumière émise par la partie capillaire du premier, traversait la partie capillaire du 2e, lui-même lumineux; le 2e tube donnait alors un spectre continu dans le voisinage de la raie fournie par le premier; les raies étaient *renversées* sur les bords; dès lors, il était facile de conclure que le rapport : $\frac{e}{a}$ n'a pas la même valeur en tous les points de la raie; la loi de Kirchhoff ne s'applique plus : il y a luminescence.

On le vérifie encore par la *théorie cinétique*; si v est la vitesse moyenne des molécules gazeuses, m leur masse, l'énergie cinétique d'une molécule est donc $\frac{1}{2} mv^2$; si, d'autre part, R est la constante des gaz parfaits (qui vaut, pour la masse moléculaire : 83×10^6), N le nombre de molécules renfermées dans cette masse moléculaire (et qui vaut: $61,7 \times 10^{22}$), et T la température absolue, on peut écrire :

9) $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}\frac{RT}{N}$; on connaît N et R. Si la pression du gaz est faible, on déduit v de la largeur des raies émises par le gaz (Buisson et Fabry); on déduit alors la valeur que T. Buisson et Fabry ont vérifié ainsi que l'expérience concordait avec la théorie, en admettant pour l'hydrogène, par exemple, que la particule lumineuse a une masse égale à celle de l'atome et que la température du gaz dans le tube est la même que celle du milieu qui entoure le tube ; ainsi la *largeur des raies* (donc la vitesse v) diminue quand on refroidit le tube extérieurement (ce qui prouve que la température du gaz est *faible* quand il émet de la lumière ; la luminescence est donc seule en cause). Enfin, une nouvelle preuve réside dans ce fait que le spectre varie beaucoup avec le caractère de la décharge.

20. *b*) **Etincelle électrique**. — Dans le cas de l'étincelle, les électrodes entrent en jeu dans la décharge (ce qui n'a pas lieu dans le tube de Geissler). Au spectroscope, on obtient en effet, outre les raies du gaz interposé entre les électrodes, celles des métaux constituants de ces électrodes ; mais, au début, on a uniquement le spectre du gaz; celui des électrodes apparaît ensuite (quand elles sont suffisamment échauffées). Les spectres d'étincelles variant avec le régime du courant de décharge, si l'on fait varier, principalement, la self-induction du circuit, les raies subissent alors des variations d'intensité sensibles.

21. *c*) **Arc électrique**. — L'arc est constitué, lui-même, par une décharge électrique entre 2 électrodes à températures différentes; la cathode, *très chaude* (condition indispensable pour que l'arc s'allume, et s'entretienne ensuite) émet des électrons en quantité appréciable ; dès lors la *différence de potentiel* nécessaire à l'entretien de l'arc n'a pas à être très élevée; mais la densité du courant, par contre, sera assez grande.

Le spectre de l'arc électrique montre des raies intenses dans le voisinage des électrodes, et il n'y a pas de raies dans l'arc lui-même ; dans le cas d'entretien de l'arc par du courant alternatif, le spectre varie avec *la phase* du courant. Il y a donc, dans l'arc, émission par luminescence ; il y a aussi émission par incandescence, puisque la température y est très élevée : 2400° centigrades dans l'arc entre électrodes de fer, en atmosphère à très basse pression (Buisson et Fabry) ; en résumé, l'émission d'un arc est *mixte* : par incandescence, et par luminescence.

CHAPITRE II

LAMPES ÉLECTRIQUES

Ire PARTIE. — LAMPES A INCANDESCENCE

22. **Principe des lampes à incandescence.** — Un fil conducteur, parcouru par un courant suffisamment intense, s'échauffe. Si le *pouvoir émissif calorifique* de la substance qui le compose est faible, l'échauffement continuant, ce fil parviendra *assez rapidement à l'incandescence* ; et il atteindra, pour le régime de courant en question (fixé par l'intensité de ce courant), une *température constante* ; à partir de laquelle les calories cédées au fil par le courant (en vertu de la *loi de Joule*) seront *émises* dans le milieu ambiant sous forme d'*énergie calorifique lumineuse* ; c'est-à-dire que la chaleur qu'il reçoit de la part du courant se transformera, *pour une certaine partie*, en *énergie lumineuse ;* ceci si aucun autre phénomène n'intervient, — en particulier, si aucune *combustion* ou *désagrégation* ne se produit ; le fil est renfermé à cet effet, dans *le vide*, ou dans un *gaz inerte* (azote, argon). En *augmentant* l'intensité du courant, la température du fil croîtra ; et il arrivera encore un moment où il atteindra une *nouvelle température de régime*, *plus élevée* que l'ancienne, et pour laquelle le même phénomène se produira : émission des calories, cédées par le courant, dans le milieu ambiant, sous forme d'énergie calorifique lumineuse. La température jusqu'à laquelle il sera possible de pousser l'incandescence est limitée par le point de fusion du fil, à une certaine distance duquel il faut s'arrêter, afin d'éviter un commencement de désagrégation.

Pour avoir une idée de la température à laquelle on peut porter un filament (température pour laquelle il devra fournir le plus de radiations visibles, c'est-à-dire entre les longueurs d'onde $0\mu6$ et $0\mu4$), rappelons que les températures *de fusion* du tungstène, du tantale, de l'osmium, et du platine, sont respectivement : 3270°, 2800°, 2700°, et 1775° ; et que le premier de ces métaux donnera, d'après la loi de Stéfan, une puissance lumineuse plus grande que les 3 autres, puisqu'on pourra s'approcher d'une température de régime normal plus élevée, avec ce

métal; nous verrons à quelles températures on a fixé le régime normal de ces métaux dans les lampes.

23. — **La loi de Joule**, appliquée à un filament qui a atteint la température de fonctionnement normal, permet de choisir entre les divers métaux et le carbone. Soient : l^{cm}, la longueur; d^{cm} le diamètre de section droite du filament supposé *cylindrique*; R, sa résistance électrique (à la température considérée de régime normal), et en ohms; ρ, sa résistivité correspondante en ohms (par centimètre de longueur, et centimètre carré de section droite); α le *pouvoir émissif total* du filament, à cette température (nous l'exprimerons en *calories-gramme*, par centimètre carré de la surface radiante : πdl, et pour chaque degré d'élévation de température t^o du filament au-dessus de la température : $t_1{}^o$ du milieu ambiant; $\theta = t - t_1$, cette élévation de température (en degrés centigrades); α est rapporté à l'unité de temps (*seconde*).

Les calories cédées au milieu ambiant (sous forme d'*énergie totale radiée*, tant lumineuse que calorifique) vaudront ainsi (par seconde) : $m = \pi dl\alpha\theta$; si nous portons cette valeur de m dans la *formule de Joule* :

(10) $4{,}18m = RI^2 = \frac{E^2}{R}$ (dans laquelle 4,18 est l'équivalent mécanique de la calorie-gramme, et E = différence de potentiel, en volts, ou tension électrique, entretenant le courant de I ampères dans le filament); il viendra : $4{,}18\pi dl\alpha\theta = RI^2$; mais : $R = \frac{4\rho l}{\pi d^2}$ (formule connue); d'où : $4{,}18\pi dl\alpha\theta = \frac{4\rho l I^2}{\pi d^2}$; on en déduit :

(11) $\theta = \frac{4\rho I^2}{4{,}18\pi^2 d^3 \alpha}$; cette formule montre que, parmi plusieurs filaments de *même diamètre* (θ est indépendante de la *longueur*, pour un courant d'alimentation donné : I), ce sont ceux du carbone qui pourront donner la température la plus élevée ; en effet, le pouvoir émissif du carbone est 10 fois plus grand que pour les métaux, mais la résistivité est 30 fois plus grande aussi, et au rouge; le carbone pourrait ainsi atteindre une température sensiblement 3 fois plus élevée : seulement, le carbone se détruit facilement, à partir du rouge-vif : il se volatilise, et se désagrège.

Si nous mettons simplement l'expression (10) après avoir remplacé m par sa valeur (sans effectuer R), sous la forme :

(12) $\theta = \frac{RI^2}{4{,}18\pi dl\alpha}$, nous voyons que, *à même surface radiante* (πdl), et pour des filaments de même résistance, alimentés par le même courant d'intensité I, ce sont les métaux qui donneront la plus haute température θ (leur pouvoir émissif étant beaucoup plus faible).

N. B.— La formule (11) montre que, pour un filament donné (de tungstène par exemple ; (α, ρ sont données), celui qui s'échauffera le plus, pour un courant donné, sera le plus mince (θ est *inversement proportionnelle* au *cube du diamètre*) ; — l'expérience vérifie ces résultats ; ainsi un filament de tungstène très *mince* (lampe de 5 bougies) est au *rouge vif*, alors qu'un filament de tungstène *plus gros* (lampe de 25 bougies) est seulement au *rouge sombre*, avec le même courant de 7 *centiampères*.

Remarque. — Le pouvoir émissif α que nous considérons dans les formules 10, 11, 12 qui précèdent, est différent du *pouvoir émissif* e (de la lumière) défini antérieurement ; la part faite à l'énergie calorifique proprement dite, au moment de l'incandescence, est mal connue ; les formules de θ données ainsi sont donc *approximatives* ; mais elles suffisent pour donner une idée de la grandeur que peut atteindre θ, à l'incandescence.

24. **Avantages des métaux.** — Rappelons-nous que, d'après la *loi de Stéfan*, l'énergie lumineuse radiée, à une température donnée, par un centimètre carré de surface d'un fil métallique, est proportionnelle à la 6e puissance de la température absolue correspondante (tungstène), tandis qu'elle ne l'est qu'à la 4e puissance de la température absolue pour le carbone ; comme cette dernière est toujours inférieure de 600° à celle du tungstène (en régime normal, dans les lampes à incandescence), on comprend tout l'intérêt que présente le tungstène, et sa grande supériorité, non seulement sur le carbone, mais sur les autres métaux (tantale, osmium) au point de vue de la richesse des radiations visibles émises.

N. B. — Nous parlerons également *des filaments d'oxydes rares*, qui fournissent beaucoup de radiations visibles.

25. **Dimensions d'un filament de lampe.** — Nous allons établir les relations qui existent entre la longueur et le diamètre de section droite d'un filament devant fournir une *intensité lumineuse sphérique moyenne donnée* L (que nous définirons plus loin), sous une différence de potentiels donnée : E. Les lampes, en effet, portent toutes ces 2 constantes sur l'ampoule.

α) *Formules fondamentales.* — Or, l'énergie lumineuse totale radiée *par seconde* : W, par un filament de pouvoir émissif e, vaut, à la *température de son régime normal* (sous la différence de potentiels : E donnée) :

$$W = (\pi l d)\ e; \text{ (voy. § 4. } c);$$

Nous verrons, d'autre part, et un peu plus loin, que l'intensité lumineuse sphérique moyenne L (on dit encore : la puissance lumineuse exprimée en *bougies décimales* (voy. plus loin. Chap. II, 1re partie. D), est proportionnelle, dans ces conditions, à l'énergie radiée par seconde : W, cette dernière (exprimée en *watts*) l'étant elle-même à la *puissance*

électrique du courant dépensée dans le filament, soit : I^2R, ou mieux $\frac{E^2}{R}$ (pour introduire la différence de potentiels : E). On peut donc poser :

(13′) $L = KW = (K\pi ld)e$; et, comme nous venons de le dire, puisque $W = C \times \frac{E^2}{R}$ (C étant une constante inférieure à l'unité, mais voisine de 1 : c'est l'équivalent lumineux de l'énergie électrique), on aura :

$$(14') \quad L = KW = KC\frac{E^2}{R} = KC \times \frac{\pi E^2 d^2}{4\rho l}.$$

Posons dans la formule (13′) : $K\pi e = A$: constante dépendant de la nature du filament (par K et e) et de sa température par e (qui *croît* avec la température, nous le savons) ; et, dans la formule (14′) : $\frac{KC\pi}{4\rho} =$ B : constante dépendant, également, de la nature du filament par K et ρ. Or, la résistivité ρ à la température de régime t, du filament, dépend de la résistivité ρ_0 à 0° centigrade, par une relation de la forme : $\rho = \rho_0(1 + at)$; pour le *platine* $\rho_0 = 8{,}98 \times 10^{-6}$ ohms ; $a = 0{,}0025$; et $t = 1300°$; d'où : $\rho = 8{,}98 \times 10^{-6} \times (1 + 1300 \times 0{,}0025) = 38{,}16 \times 10^{-6}$ ohms ; pour le *tantale*, on a : $\rho_0 = 16{,}38 \times 10^{-6}$ ohms ; $a = 0{,}0025$; $t = 2200°$; d'où : $\rho = 16{,}38 \times 10^{-6} \times (1 + 2200 \times 0{,}0025) = 106{,}47 \times 10^{-6}$ ohms ; enfin, pour le *tungstène* : $\rho_0 = 5{,}3 \times 10^{-6}$; $a = 0{,}0054$; $t = 2600°$; d'où : $\rho = 5{,}3 \times 10^{-6} \times (1 + 2600 \times 0{,}0054) = 79{,}7 \times 10^{-6}$ ohms. On voit ainsi que ρ, pour le tungstène, est plus de 2 fois plus grand que pour le platine ; pour le tantale, au contraire, il est : $\frac{4}{3}$ fois plus grand que pour le tungstène. On voit aussi comment la constante B varie d'un métal à l'autre.

Pour le *carbone*, au contraire, on a : $\rho_0 = 4{,}486 \times 10^{-3}$ ohms (charbon graphité, tel qu'on l'emploie actuellement); $a = -0{,}00032$; $t = 1700°$ centigrades ; d'où :

$\rho = 4{,}486 \times 10^{-3} \times (1 - 1700 \times 0{,}00032) = 2{,}04 \times 10^{-3}$; le charbon présente cette particularité que : « sa résistivité *décroit* quand la température s'élève », contrairement à ce qui se produit pour les métaux ; à la température du régime normal, elle n'est plus que les 45,5 °/₀ de la résistivité à 0° ; mais c'est pour le carbone graphité que ρ prend la plus grande valeur en régime normal ; elle vaut 25 fois celle du tungstène dans les mêmes conditions de régime normal.

β) *Relations entre les dimensions du filament.* — En reprenant les formules : (13′) et (14′) avec l'introduction des constantes nouvelles A et B, il viendra :

$$(13)'' \quad L = Ald;$$

$$(14)'' \quad L = BE^2\frac{d^2}{l}.$$

Eliminons l entre ces équations, il viendra : $L^2 = ABE^2d^3$; d'où l'on tire :

$$(13) \quad d = \left(\frac{1}{AB}\right)^{1/3} \times \left(\frac{L}{E}\right)^{2/3}.$$

En portant dans (14″) et effectuant, on aura :

$$(14) \quad l = \left(\frac{B}{A^2}\right)^{1/3} \times (E^2L)^{1/3}.$$ Ces formules montrent :

1° que L et E étant données à l'avance, d sera en général très faible ; pour ne pas descendre à une valeur trop petite, — afin que l'étirage du filament soit possible, — il faut prendre pour le rapport $\frac{L}{E}$ une valeur supérieure à une certaine limite, $\frac{4}{100}$ environ pour le filament de carbone et pour le filament de tungstène, dans le vide ; $\frac{20}{100}$ pour le filament de tungstène en atmosphère gazeuze ;

2° que l est d'*autant plus grande* que L et E sont *plus grands* : en effet L dépend, toutes choses égales, de la surface radiante qui est proportionnelle à l et à d ; il faudra prendre l d'autant plus grande que d sera plus faible.

Le filament est rarement rectiligne (dans quelques lampes destinées à l'éclairage des miroirs des appareils de mesures électriques : galvanomètres, wattmètres) ; dans les lampes destinées à l'éclairage des appartements, des ateliers, des bureaux, des magasins, des amphithéatres, il est en *boucle* (cas du carbone), ou en *hélice* (cas des métaux). Dans l'enroulement en boucle, l'intensité lumineuse suivant les diverses directions varie sensiblement, comme nous le verrons. Dans l'enroulement en hélice, quelques spires masquent une partie du rayonnement émis par d'autres spires, et l'intensité moyenne diminue légèrement.

A. — LAMPES A FILAMENT DE CARBONE

Nous allons étudier, successivement, les *propriétés physiques* du filament de carbone, les *conditions de son emploi*, et la *construction* des lampes au carbone.

26. **Propriétés physiques du filament de carbone.** — Le filament de carbone n'a été essayé qu'après le filament de platine. Or, le platine ne fournit de *radiations sélectives* (c'est-à-dire comprises entre les longueurs d'onde égales à $0\,\mu\,6$ et $0\,\mu\,4$) qu'à une température de 1700°,— toute proche de son point de fusion : 1775°,— et l'on ne peut l'employer à une température aussi élevée, car la moindre élévation de tension élec-

trique (E) amène rapidement la destruction du filament. Le carbone l'a donc supplanté dès les débuts de la fabrication des lampes à incandescence. Les avantages essentiels du carbone, à l'origine de la construction des lampes résidaient :

1° Dans sa *résistance aux températures élevées* (il ne fond pas, même au four électrique, à 4.000°); et 2°) dans ce fait : que la constante $\left(\frac{1}{AB}\right)^{1/3}$ de la formule (13) y prend des valeurs assez grandes (B, à cause de la valeur très grande de ρ, y est très faible, et par suite $\left(\frac{1}{AB}\right)^{1/3}$ prend des valeurs plus grandes qu'avec les métaux), donc d n'est pas trop petit ; — et il serait difficile d'obtenir des *filaments* de carbone *tenaces* avec de très petits diamètres. — On emploie généralement, pour d, des valeurs comprises entre 0 m/m 075 et 0 m/m 230; la longueur l des filaments varie de 15 à 20 c/m. On obtient ainsi des intensités lumineuses (L) assez faibles avec une tension électrique (E) assez grande ; il est difficile d'avoir de grandes intensités lumineuses (voy. formules 13, 14).

Nous avons vu que la *résistivité* du carbone graphité ($4,485 \times 10^{-3}$ ohms à 0°), et aussi celle du carbone non graphité (2.238×10^{-3} ohms à 0°) diminuent quand la température s'élève ; il en résulte que la *résistance* d'un filament de carbone en régime normal n'est plus elle-même que les 45 % de celle à 0° (C. graphité), et les 40 % de celle à 0° (C. ordinaire) ; (les *résistances* d'un filament, à 1700° et à 0°, sont dans le *même rapport* que les *résistivités* aux températures respectives); dès lors le filament de carbone est *très sensible* aux variations de la tension électrique; car à la moindre élévation de tension E, le courant I croît ; et, comme la résistance diminue, I croît davantage, et la température s'élève sensiblement : la lampe n'est pas, par conséquent, autorégulatrice.

N. B. — Nous verrons *plus loin* (§ 49 ; 4°) comment on peut rendre, par une *résistance de compensation*, une *lampe* au *carbone autorégulatrice*.

Le filament étant dans le vide, non seulement il n'y a pas de combustion du carbone, mais il n'y a *pas conductibilité calorifique* du filament à l'ampoule ; la perte de calories par *conductibilité* est presque nulle; par *convection* dans l'air autour de la lampe (l'ampoule s'échauffant par *rayonnement*, ce qui produit une légère convection autour de cette ampoule dans l'air environnant) les pertes au total ne dépassent pas 2 % de l'énergie calorifique fournie à la lampe par le courant.

27.— **La température** du filament en régime normal (nous verrons plus loin comment on la détermine) est voisine de 1700° centigrades (Waindner et Burgess), sous le régime de 3 watts par bougie décimale ; on peut aller un peu au-delà pour accroître les radiations visibles. En effet,

en appliquant la formule de Wien à ce *corps gris*, on obtient pour la longueur d'onde relative au maximum de l'énergie lumineuse émise ($t^o = 1700^o$ centigrades correspondant à $T = 1700 + 273 = 1973^o$ absolus) :

$\lambda_m = \frac{2.940}{1.973} = 1\mu 49$: ce qui nous place dans l'*infra-rouge*, loin du spectre visible. Il faudrait donc, pour obtenir plus de radiations sélectives, avoir une longueur d'onde plus voisine de $0\,\mu\,8$: mais alors la température à atteindre serait trop élevée, et le filament se détruirait ; la *graphitisation* du filament permet d'approcher davantage d'une température plus élevée, car on peut « survolter » la lampe de 10 à 15 °/₀ ; l'intensité lumineuse est alors *doublée* mais la durée du filament est restreinte en conséquence. — Avec un filament graphité on peut obtenir une température plus élevée, 1800 à 1900° : donc, plus de radiations visibles.

28. **Electrovaporisation ; émission électronique du carbone.** — Quand le filament d'une lampe au carbone est survolté, la température s'élève rapidement comme nous l'avons exposé antérieurement ; et alors, bien qu'étant éloigné de son point d'ébullition, le carbone se vaporise, à cause de la texture lâche et grenue qu'il présente alors ; il se produit ainsi une projection d'*ions* de carbone sur l'ampoule, laquelle noircit rapidement, et le filament se désagrège peu à peu. Cette électrovaporisation du carbone est corrélative d'une émission d'électrons négatifs, comme l'expérience le vérifie et comme nous le montrerons tout à l'heure.

N. B. — L'électrovaporisation du filament graphité est beaucoup *plus lente* que celle du filament de *carbone*.

α) *L'émission électronique* du carbone est caractérisée par l'intensité du courant électronique produit ; soit I ce courant par centimètre carré du filament et par seconde ; il vaut (d'après Lummer) :

(15) $I = 0,725 \times 10^{-12} \times T^4$: l'émission électronique est donc proportionnelle à la 4ᵉ puissance de la température absolue, tout comme l'émission de l'énergie lumineuse (rev. loi de Stéfan) ; on conçoit ainsi qu'elle est d'autant plus grande que la température est plus élevée.

β) D'autre part, l'on peut assimiler cette vaporisation du carbone à la vaporisation d'un liquide par exemple, et considérer les électrons comme des particules de vapeur. Si l'on opère avec le filament d'une lampe où le vide est presque absolu (vide obtenu à l'aide d'une pompe à diffusion), l'on peut en repérant quelques températures de fonctionnement, et en évaluant les pertes de masse du filament (par pesées)

écrire la formule de la vitesse d'évaporation ; laquelle d'après Langmuir, est donnée par :

(16) $m = p\sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}$; où p = pression des électrons ; T = température absolue ; M : masse moléculaire des électrons (produit du nombre d'électrons dans la masse moléculaire : 61×10^{22}, par la masse d'un électron : 9×10^{-28}; soit $M = 549 \times 10^{-6}$); R = constante des gaz parfaits pour la masse moléculaire $= 83 \times 10^{6}$ (voy. § 19) ; $\pi = 3,14$, d'où :

(16) $m = p\sqrt{\frac{549 \times 10^{-6}}{6,28 \times 83 \times 10^{6}}} \times \frac{1}{\sqrt{T}} = \frac{p}{\sqrt{T}} \times 1,026 \times 10^{-6}$; la pression de saturation p est donnée, d'autre part par la formule :

(17') $T^{3/4}p = \underset{e}{}\left(C - \frac{0,218\lambda_0}{T}\right)$; dans laquelle : e = base des logarithmes népériens ; C = une constante pour le carbone ; λ_0 = chaleur de vaporisation des électrons à la température de 0° absolu, on en tire par logarithme :

(17) $\log_e p = C - \frac{0,218\lambda_0}{T} - \frac{3}{4}\log_e T$. Et en s'aidant de la formule (16)

$\log_e m = \log_e p + \log_e(1,026 \times 10^{-6}) - \frac{1}{2}\log_e T$, il vient finalement :

(18)' $\log_e m = C + \log_e (1,026 \times 10^{-6}) - \frac{0,218\lambda_0}{T} - \frac{5}{4}\log_e T.$

MM. H. Jedrzeiewski et L. Wertenstein ont trouvé, pour λ_0 (en poussant l'incandescence jusqu'à T = 5.100° absolus) : $\lambda_0 = 2 \times 10^{5}$ calories ; d'où : $0,218\lambda_0 = 436 \times 10^{2}$; posons : $C + \log_e (1.026 \times 10^{-6}) = C'$, il vient enfin :

(18) $\log_e m = C' - \frac{436 \times 10^{2}}{T} - \frac{5}{4}\log_e T$, laquelle montre aisément que, lorsque T s'élève, les termes *soustractifs* ne se comportent pas de la même façon : $\left(\frac{436 \times 10^{2}}{T}\right)$ diminue ; mais $\left(\frac{5}{4}\log_e T\right)$ augmente ; la diminution l'emportant toujours sur l'augmentation, ($\log_e m$) croît quand T croît : l'*électrovaporisation croît donc avec la température.*

29. **Expérience mettant en évidence l'émission électronique.** — Edison a, le premier (1895), montré l'existence d'un courant électronique de la manière suivante (fig. 10) : dans une ampoule de lampe à filament de carbone dans le vide, il avait soudé une lame de platine p en face de la boucle a, et relié cette lame au pôle + de la lampe, par l'intermédiaire d'un *milliampèremètre* A ; dès que le courant d'allumage de la lampe était lancé dans le filament, un courant s'établissait, *dans le*

vide, entre la lame *p* (à un potentiel positif, puisqu'elle est reliée à la borne + de la lampe) et le filament. Edison attribuait ce phénomène (dit : *effet Edison*) à l'existence des *ions* gazeux existant en faible proportion dans l'atmosphère de l'ampoule, par suite des réactions entre le filament et le gaz. Richardson, en 1903, et Langmuir (en 1913) montrèrent que ce phénomène subsiste même dans un vide *particulièrement poussé* et donnèrent l'explication vraie du phénomène : lequel est dû à *l'émission d'électrons négatifs*, par la surface incandescente du filament, ces électrons étant attirés par une électrode positive (la lame *p* de l'expérience d'Edison) ; d'où le *courant électronique* ou *thermoïonique* en question.

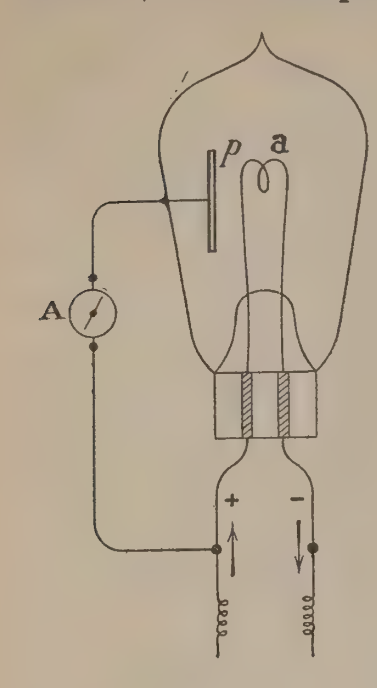


Fig. 10.

N. B. — Nous reverrons ce phénomène dans les lampes à *filament métallique* ; et nous montrerons comment on l'utilise pour la réalisation de certaines valves servant à redresser le courant alternatif (kénotrons ; ou lampes triodes.)

30. **Construction d'une lampe à filament de carbone.** — *a*) *Constitution-type.* — Une telle lampe se compose d'un filament mince, introduit dans une ampoule en verre dur, où le vide a été fait à $\frac{1}{100}$ ou $\frac{2}{100}$ de millimètre (de mercure), à l'aide de pompe à huile. Les bouts du filament sont soudés à 2 fils de platine, puis ceux-ci à 2 fils de nickel, ou de maillechort, qui aboutissent à 2 pastilles métalliques permettant d'établir le passage du courant quand la lampe est fixée sur son support *ou douille.* La pièce en laiton, — ou autre alliage de nickel, zinc, cuivre, — qui maintient l'ampoule se nomme *culot* ; elle porte les pastilles de contact, et deux brides disposées selon les extrémités d'un diamètre, et s'adaptant dans deux rainures en té de la douille, pour la mise sur circuit. Les fig. 11 et 12 montrent respectivement : la lampe terminée, avec l'indication sur le culot ou l'ampoule, de *l'intensité lumineuse* et de la *tension normale* (ici : *16* bougies ; *110* volts) ; et la douille qui doit la recevoir ; la fig. 13 montre les détails du culot (*brides* : *a*, *b* ; pastilles : α β ; fils de nickel : *f*. *g*) ; et de la douille : 2 pistons en laitons *p* sont constamment repoussés par 2 ressorts *r* à boudins logés dans 2 pièces cylindriques fixes *m* maintenues par les écrous *e* sur la base en porcelaine *k* de cette douille et serrées contre les fils conducteurs F, G du courant (lesquels font partie du circuit d'alimentation sur lequel la douille est fixée) ; quand on enfonce le culot dans la douille,

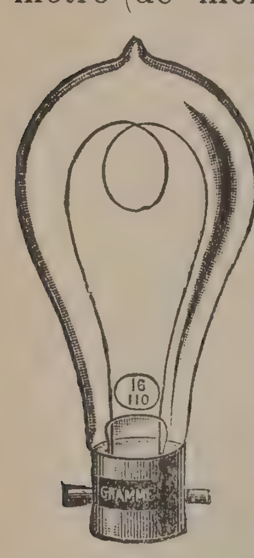


Fig. 11.

en présentant les brides dans les portions verticales t des rainures, les pistons sont refoulés par pression ; on tourne la lampe sur son axe, pour engager les brides dans les encoches horizontales u, et l'on abandonne cette lampe à elle-même : les ressorts en réagissant, repoussent les pistons p qui viennent se placer sur les pastilles du culot ; et le circuit se fermera sur le filament, dès que l'interrupteur de chaque lampe (voy. plus loin : E. Applications à l'éclairage) sera convenablement tourné.


Fig. 12.

Une lampe du type de la fig. 11, est dit : *à baïonnette*.

Dans les *lampes à vis* (qui ne sont employées que pour les intensités lumineuses plus élevées, ou quand les lampes doivent être solidement maintenues, comme dans les voitures de trains et de tramways), le *culot* est pourvu d'un *pas de vis extérieur* (fig. 14), qui permet de le visser sur une *douille* filetée intérieurement (fig. 15) et pourvue d'une manette rotative. Quand la lampe est vissée à fond par son culot, il y a contact entre la paroi C du culot (fig. 16, *détails*), à laquelle est soudée intérieurement l'extrémité du fil g de nickel venant du filament, et la paroi C soudée à un fil (en pointillés) g_1g_2 qui aboutit à une borne α à l'intérieur de la douille ; il y a aussi contact entre la pastille unique D du culot et la plaque de laiton D′ de la douille, mise en relation par un fil f_1f_2 avec une borne β ; la plaque D′ est isolée électriquement de la paroi C, par une plaque d'ébonite m. La clef a qui traverse la douille, et qui est mue par la manette extérieure M, porte une vis v ; cette clef est formée de 2 parties (en b) séparées par un ressort ; la partie extérieure ou *manchon* : a, est en contact permanent avec les fils (g_1g_2) ; la partie centrale isolée du manchon peut tourner à l'aide de la manette M ; par une rotation convenable de la tige b, la vis v s'avance dans une rainure hélicoïdale et vient buter contre un cran d'arrêt, le ressort se bande, et le contact s'établit grâce à b entre les fils (g_1g_2) : le circuit de la lampe est *fermé* sur la dérivation, par α et β, donc par les fils F, G qui y aboutissent. Une rotation de la manette M

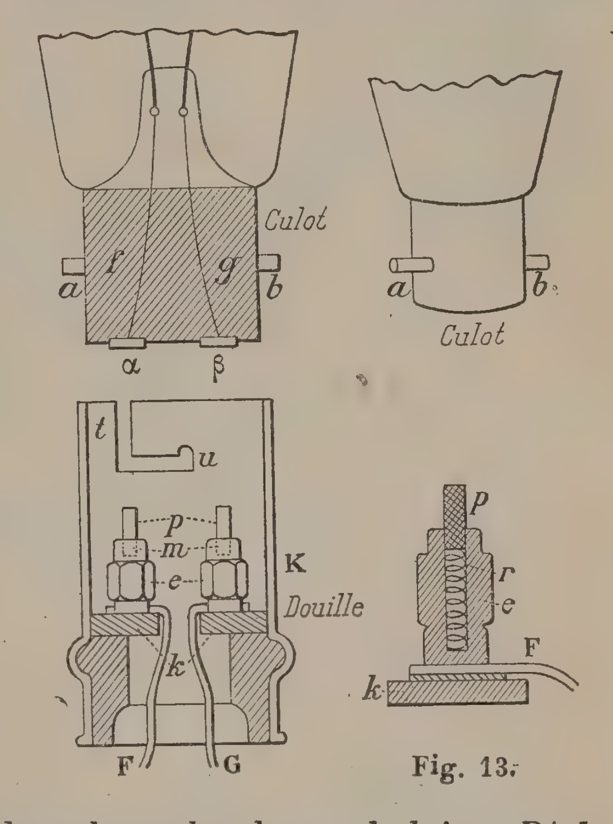
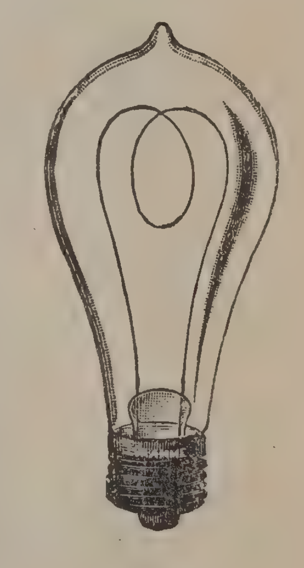


Fig. 13.

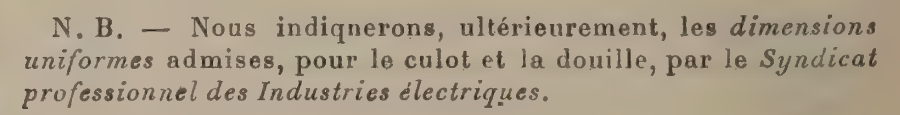

Fig. 14.

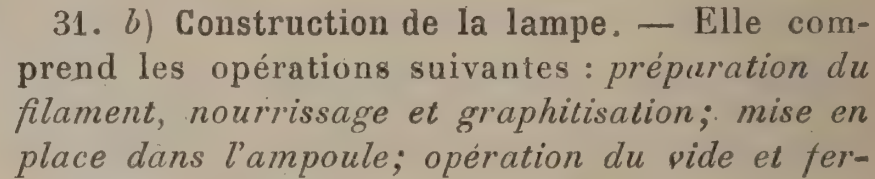
en sens inverse ramène v dans la position de la figure 16 : le circuit est interrompu.

N. B. — Les contacts obtenus avec le dispositif à vis sont douteux ; ils s'altèrent par l'usage, soit par usure des vis (de C et C'), soit par le détraquement du ressort de la clef.

Quelques douilles à vis (lampes de grandes intensités lumineuses) sont dépourvues de clef d'allumage ; les pièces C' et D' étant jointes, d'une façon permanente, respectivement aux bornes α et β, un vissage à fond établit la fermeture du circuit.

Fig. 15.


N. B. — Nous indiquerons, ultérieurement, les *dimensions uniformes* admises, pour le culot et la douille, par le *Syndicat professionnel des Industries électriques.*


31. *b*) **Construction de la lampe.** — Elle comprend les opérations suivantes : *préparation du filament, nourrissage et graphitisation; mise en place dans l'ampoule; opération du vide et fermeture de l'ampoule; achèvement de la lampe; vérification de la lampe.* Nous allons étudier ces diverses opérations.

1° Préparation du filament. — Elle est réalisée en partant des fibres de cellulose, que l'on *carbonise*, que l'on *nourrit* s'il est nécessaire, et que l'on *graphitise* enfin. La cellulose (fibres végétales, papier, coton) étant un hydrate de carbone, perd son eau de constitution au rouge (dissociation), et laisse du *carbone pur.*

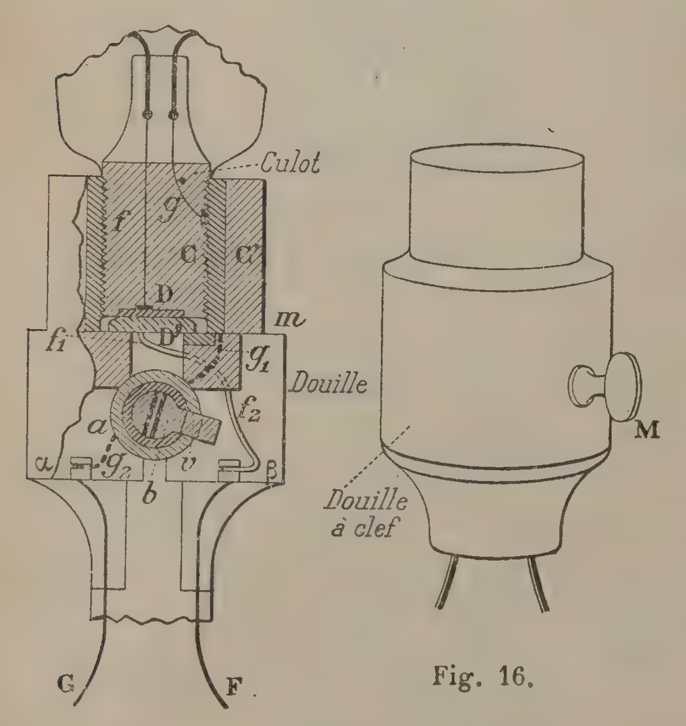


Fig. 16.

On emploie : soit des fibres de *bambou*, soit des bandes de *bristol*, soit des fils de *tamidine*, soit des fils de *coton* spécialement préparés (procédé nouveau).

α) Les fibres de *bambou* (âgées de 3 ans), sont découpées en filaments de 10 à 12 centimètres de longueur, et 1 millimètre de diamètre ; on les carbonise dans un moule en nickel, présentant en creux la forme que doit prendre le filament (en boucle ou en U); on ferme hermétiquement ce moule, et on le porte au four ; on laisse ensuite refroidir lentement (procédé Edison).

β) Les bandes de *bristol* sont découpées en U ou en M, et *roussies* entre 2 plaques de fonte rougies;

γ) Les bandes de *tamidine* sont obtenues à l'aide d'une sorte de celluloïd préparé en traitant un mélange de coton-poudre et de camphre par le sulfate d'ammonium ; on lamine en feuilles minces, et l'on découpe des bandes minces dans ces feuilles, que l'on roussit comme celles de bristol;

δ) Le *procédé nouveau* donne un meilleur filament, obtenu en partant d'une solution de coton dans le chlorure de zinc pur additionné d'acide chlorhydrique ; on a une *gelée* que l'on filtre, et que l'on étire par compression dans une filière en platine; il sort un filament que l'on fait passer dans l'alcool méthylique pour lui donner une consistance plus solide ; on lui donne alors la forme voulue (en U, ou en boucle), dans un moule en nickel que l'on ferme hermétiquement, et que l'on porte à 3000° (dans un four électrique), afin de le carboniser totalement. On le *nourrit* ensuite en le faisant rougir (par le passage d'un courant électrique) tandis qu'il est enveloppé d'une atmosphère d'essence de pétrole : celle-ci se dissocie au contact du filament incandescent, et dépose du carbone *graphitoïde* à sa surface.

δ') Un *autre filament* (*système Planchon*) qui donne d'*excellents résultats*, est obtenu à base de cellulose traitée d'une façon spéciale (procédé secret) et filée par compression à travers une filière de diamant ; le filament est ensuite moulé (en boucle, en U, en ellipse) et soumis à une température de 1800° environ, (dans des fours en vase clos) ; après cuisson suffisante, le charbon obtenu se rapproche beaucoup du graphite, comme texture, et est d'un calibrage tellement régulier que l'on n'a pas toujours besoin de le carburer ultérieurement.

Quand on veut carburer un filament de cette nature, on emploie de préférence la gazoline, ayant pour densité 0,65 ; on l'envoie à l'état de vapeur dans la cloche où le filament est maintenu incandescent ; pour les *gros filaments*, la pression de la vapeur ne doit pas dépasser 35 $^m/_m$ de mercure ; pour les *filaments fins* on utilise une pression de 75 $^m/_m$; il est préférable d'utiliser le *courant alternatif* pour l'incandescence du filament, afin d'obtenir la dissociation de la gazoline, *sans électrolyse* ; on maintient constante la tension aux bornes du filament, pendant sa *carburation*, en le disposant en série avec une *résistance de compensation* réglable (voy. § 49, 4°), et de façon que cette résistance augmente (cas d'une résistance métallique) quand celle du filament *diminue* (c'est-à-dire quand son diamètre s'accroît par la carburation qui se poursuit).

N. B. — Le diamètre d et la longueur l des filaments dépendent, nous l'avons vu, de l'intensité lumineuse à obtenir (rev. § 25 et 26).

ε) *Nourrissage.* — On nourrit tous les filaments, préparés comme il vient d'être dit, afin d'éviter les défauts de calibrage, — lesquels se tra-

duiraient par une incandescence plus grande des sections plus faibles (rev. formule 11), d'où une altération rapide du filament ; ces défauts s'observent en examinant, à la loupe, un filament simplement au *rouge sombre* (sous une tension électrique comprise entre 20 et 30 volts), dans une cloche à atmosphère non comburante.

On évite, par le nourrissage, ce défaut de calibrage : on dispose la filament, préparé et sortant du moule, dans une atmosphère d'hydrocarbure d'hydrogène ; l'on *pousse* graduellement le filament, du rouge sombre au rouge vif, à l'aide d'un courant électrique d'intensité croissante : l'hydrocarbure est dissocié par l'incandescence et au contact du filament, et le carbone libre se dépose sur celui-ci.

Pendant le nourrissage, on soumet le filament à des mesures de résistance : le nourrissage, accroissant le diamètre, *diminue* cette résistance (que la carbonisation avait rendue un *peu plus grande* que celle que l'on s'était fixée à l'avance, par les formules 13, 14 ; et ceci, à cause de la texture grenue prise pendant cette carbonisation) ; on arrête l'opération quand la résistance a pris la valeur antérieurement fixée pour la tension normale : E.

θ) *Graphitisation*. — Nous avons dit, précédemment, l'avantage que présente le graphite sur le carbone ordinaire (facilité d'obtenir une température plus élevée, donc un plus grand nombre de radiations sélectives; et, aussi, ralentissement de l'électro-vaporisation et *réduction* de la *consommation spécifique* en watts par bougie (voyez plus loin : Essais des lampes) : Tous les filaments qui précèdent, après nourrissage, sont actuellement *graphitisés* de façon à présenter, tout au moins à la surface, et selon une épaisseur qui sera d'autant plus grande que l'opération aura duré davantage, les mêmes caractères que le graphite pur. On dispose le filament dans un moule d'*argile graphiteuse*, bien fermé, et l'on expose ce moule au four électrique ; à la température de l'arc (près de 4000° centigrades), la transformation du carbone en graphite se fait en partant de la surface, et vers le cœur du filament (procédé Howell).

32. 2° **Mise en place dans l'ampoule.** — On soude d'abord le filament F (fig. 17) aux électrodes. Pour cela, on a préparé à l'avance 2 électrodes constituées par 2 fils minces de platine c, c', soudés respectivement à 2 cordons (plus gros) de nickel a, a', à l'aide de 2 boutons de cuivre β, β' (par électrolyse) ; les fils de platine sont terminés par des crochets α, α'. On prend un tube de verre aplati T, et ouvert en haut, on fait passer les fils de platine c, c', par la fente supérieure de ce tube, et l'on ferme à la flamme d'un chalumeau, de façon à ce que le verre, ramolli au contact de la flamme, emprisonne les fils de platine seuls (ce métal, ayant sensiblement même coefficient de dilatation que le verre, restera toujours en place pendant le fonctionnement ultérieur de la lampe, et l'étanchéité sera garantie du côté de l'ampoule) ; le filament est alors accro-

ché par ses extrémités inférieures en α et α'; un dépôt électrolytique de nickel (dans un bain de sulfate de nickel) est opéré en α, α', afin d'obtenir un contact intime de ces liaisons. On introduit ensuite le dispositif ainsi obtenu dans une ampoule de verre A, effilée et ouverte en b (fig. 17); la base évasée du tube T venant reposer sur la base, évasée aussi et un peu plus large : E E, de l'ampoule A; on soude à la flamme du chalumeau, en EE, de façon à emprisonner le tube T à la base de l'ampoule; il reste alors, au-dessous de E, une partie cylindrique *ee* qui sera introduite plus tard dans le culot D.

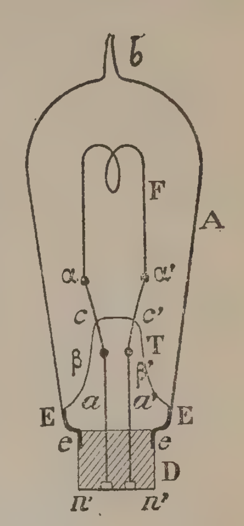


Fig. 17.

33. 3° **Opération du vide; fermeture de l'ampoule.** — On relie l'ampoule ainsi garnie, par la pointe effilée b, à une pompe à mercure (Sprengel), ou à une pompe rotative à huile (sans espace nuisible, ce qui permettra d'obtenir un vide plus parfait); quand le vide est déjà avancé, on relie le filament, par les électrodes a, a' (qui dépassent le tube T et par suite l'ampoule à sa partie inférieure) à la prise de courant, et l'on pousse graduellement à l'incandescence : les gaz occlus dans le filament s'échappent, entraînés par la pompe *qui ne cesse de fonctionner* (ces gaz renferment de l'oxygène qui provoquerait ultérieurement l'oxydation du filament, si l'on n'opérait ainsi). Plusieurs séries de lampes communiquent ainsi avec la pompe à vide; un tube de Geissler, disposé sur le circuit de la pompe auquel il est relié par une tubulaire mince, indiquera que le vide est suffisant (il est alors voisin de $\frac{10}{1000}$ de millimètre de mercure), quand il cessera de s'illuminer sous les décharges d'une bobine de Ruhmkorff (qui l'entretient spécialement) : On fermera alors la lampe en b, à la flamme du chalumeau : le filament est alors *emprisonné* dans le vide, l'ampoule étant fermée en b et T.

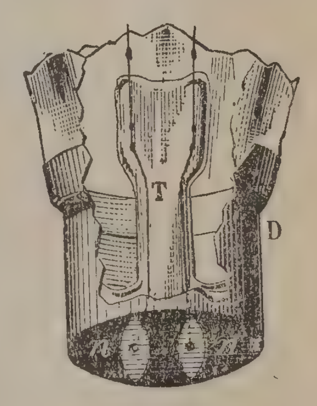


Fig. 18.

34. 4° **Achèvement de la lampe.** — Il ne reste plus qu'à assujettir l'ampoule, par la partie cylindrique évasée EE, dans le culot en laiton ou en maillechort; à cet effet, la lampe est *renversée* (pointe b en bas); on soude le culot aux bords EE de l'ampoule, à l'aide d'émail que l'on coule; on achève de le remplir de plâtre ou de kaolin jusqu'au bord, on laisse sécher; puis on coupe, à la pince, les bouts des électrodes de nickel qui dépassent, et l'on coule enfin les 2 pastilles n', n (en plomb-étain), qui emprisonnent les extrémités des électrodes; une dernière couche de kaolin est versée, puis on coule de la vitrite, en ayant soin de laisser émerger les pastilles n', n.

Quelquefois, on se contente de couler de l'émail à l'intérieur du culot, pour souder la base de l'ampoule, et fixer les pastilles (fig. 18).

N. B. — S'il s'agissait d'une lampe à *culot à vis*, on procéderait absolument de même; sauf que l'on soude, avant la coulée de l'émail dans le culot, l'extrémité de l'électrode *g* (fig. 16) à la paroi interne du culot; il n'y a qu'une pastille à souder : D, dans ce cas, à l'électrode *f*, en fin d'opération.

35. 5° **Vérification de la lampe.** — La lampe, une fois construite, est vérifiée de la façon suivante :

α) *vérification photométrique* : on porte la lampe au banc photométrique, et l'on vérifie sa puissance lumineuse (nous indiquerons comment, au § D. Essai des lampes); on se rend compte des variations de cette puissance avec la tension électrique, — pour voir si elle *résiste* à une surtension de 10 %, par exemple, limite admise.

N. B. — On vérifie *souvent* la puissance lumineuse avant la *fixation du culot*, de façon à éviter l'achèvement inutile d'une lampe qui s'écarterait trop des limites imposées à l'avance.

Les indications de l'*intensité lumineuse horizontale*, en *bougies décimales*, et de la *tension normale* correspondante, en *volts*, sont ensuite gravées sur le culot; avec, quelquefois la *date* de la fabrication, et un *numéro d'ordre*.

β) *Vérification du calibrage*, et *de l'étanchéité* : On allume simultanément, par groupes de 50 ou de 100, toutes les lampes de même intensité, sur une rampe d'essai pendant 20 heures environ : toutes les lampes doivent donner une même impression de luminosité sous la même tension aux bornes.

On vérifie, à l'aide de lunettes noires (verres fumés), le bon calibrage des filaments ; une lampe où le filament présenterait des *étranglements* est mise au rebut ; si l'étanchéité d'une lampe n'est pas parfaite, l'on voit se produire, au bout de quelques secondes d'allumage, un *éclair* dû à la combustion du filament grâce à une rentrée d'air : la lampe se met ainsi d'elle-même au rebut.

B. — LAMPES A FILAMENT MÉTALLIQUE

Nous allons examiner, comme dans le cas précédent, les propriétés physiques des filaments métalliques, les conditions de leur emploi, et la construction des lampes.

36. **Filaments métalliques.** — α) Le *platine* ne devient incandescent, — et fournit ainsi des radiations visibles, — que lorsqu'il se trouve assez près de son point de fusion (qui vaut 1775°) ; il faudrait donc le maintenir à une *température plus basse*, mais alors il ne fournirait pas une lumière utilisable, — ou éviter une surtension sur le réseau qui l'alimente, ce qui est impossible. Ce métal est donc abandonné.

Le *tantale*, très ductile, très tenace, a été utilisé jusqu'en 1914, par la société Siemens et Halske (de Berlin), dans la fabrication de lampes intéressantes, puisque succédant pour la 1re fois aux lampes à filament de carbone, elles présentaient un avantage appréciable sur ces dernières : la consommation en watts par bougie décimale s'élevait à 1 watt 6 (au lieu de 3 vatts) ; le métal, fondant vers 2800° centigrades, permettait son emploi jusqu'à 2000° (température supérieure de 300° à celle du carbone), ce qui donnait plus de radiations visibles : *on ne construit plus ces lampes.*

β) L'*osmium* fond vers 2700° centigrades, on peut l'employer jusqu'à 1900° ou 1950°, et il fournit beaucoup de radiations sélectives; malheureusement, il est très fragile, et ne peut convenir que jusqu'à une tension électrique de 75 volts; il est *mou*, et se rompt facilement ; on peut le *faire durer davantage* en disposant son filament verticalement, et dans des lampes à *poste fixe*, sans vibrations ; l'*électrovaporisation* est lente (masse atomique du métal : 191) ; on l'emploie *très peu*.

γ) Le *zirconium* est très *mou* à chaud, donc très fragile, il ne peut s'employer seul ; il donne beaucoup de radiations sélectives ; ajouté en petites portions au *tungstène*, il augmente la proportion de ses radiations visibles (filament des *anciennes lampes Z*).

δ) Le *titane* (extrait de l'oxyde TiO^2) se fabrique comme le tungstène (voy. ci-après) mais la moindre trace de carbone le rend très cassant; on l'*allie au tungstène* comme l'*osmium*.

ε) Le *tungstène*, enfin, présente les avantages indiqués déjà précédemment; depuis qu'on a pu l'*étirer en fils tenaces*, il a supplanté le tantale; le minerai est assez fréquent en France, et la consommation spécifique du filament beaucoup plus faible que celle du filament de tantale : ce métal est donc exclusivement employé aujourd'hui, le plus souvent pur, quelquefois allié au titane (filament *Allen*, américain), quelquefois à l'*osmium* (filament allemand), ou au *zirconium* (filament Z).

37. **Propriétés physiques du filament de tungstène.** — Le tungstène se retire de l'oxyde TuO^3 qui existe dans la minerai dit « Wolframm » ; nous indiquerons plus loin comment se fait cette extraction, à propos de la fabrication du filament. Ce métal est tenace (plus que l'acier) et très ductile, puisqu'on peut l'étirer en fils de 10 microns de diamètre.

Si l'on se reporte aux formules (13) et (14) du (§ 25. β), l'on voit que, la résistivité du tungstène, à la température normale de fonctionnement (2200° centigrades pour les lampes *dans le vide*) étant 25 fois moindre que celle du carbone, la constante B est beaucoup plus grande; et *d*, pour E (tension) et L (intensité lumineuse sphérique moyenne) données, est *beaucoup plus faible* que pour le carbone, ce

qui créait une difficulté lorsqu'on ne pouvait fabriquer (avant 1916) que des filaments *filés à la presse*, donc pas très minces.

Mais les procédés modernes ont permis d'*étirer* le métal, et l'on peut employer actuellement des calibres variant de 25μ à 120μ, selon l'intensité lumineuse à obtenir, avec des longueurs l variant de 40 c/m à 1 mètre. — Rappelons que le point de fusion est 3270° centigrades, et que l'on pousse le filament jusqu'à 2200° (lampes à vide), et jusqu'à 2600° (lampes en atmosphère gazeuse inerte) : dans ce dernier cas, la longueur d'onde λ_m correspondant au maximun de l'énergie lumineuse émise, est voisine de $1\mu 14$ (pour 2200°), et de 1μ (pour 2600°) : on s'approche ainsi du spectre visible, et l'*éclat* (intensité lumineuse par centimètre-carré de surface du filament) atteint aisément 100 à 200 bougies-centimètre-carré (2200°), et même 1000 bougies-centimètre-carré (2600°), d'après M. A. Blondel.

La résistivité du *tungstène pur* vaut $\rho_0 = 5{,}3 \times 10^{-6}$ ohms à 0°, avec un coefficient de température $a = 0{,}0054$; à 2200° (filament dans le vide), la résistivité vaut :

$$\rho = \rho_0 (1 + 0{,}0054 \times 2.200) = \rho_0 \times 12{,}88; \text{ d'où : } \frac{\rho}{\rho_0} = 12{,}88;$$

pour le *tungstène pur* dans un gaz inerte (2.600°), on aura :

$$\rho' = \rho_0 (1 + 0{,}0054 \times 2.600) = \rho_0 \times 15{,}04;$$

pour le tungstène à *traces de fer*, employé pour les *plus faibles* filaments (le fer donnant plus de ductilité au tungstène), on a : $\rho_0 = 5{,}31 \times 10^{-6}$ ohms, avec : $a = 0{,}0048$; d'où pour le rapport $\frac{\rho}{\rho_0}$ (à 2.200°, dans le vide) $= 1 + 0{,}0048 \times 2.200 = 11{,}56$; et pour $\frac{\rho'}{\rho_0}$ (à 2.600°, en atmosphère gazeuse) $= 1 + 0{,}0048 \times 2.600 = 13{,}48$. (Les valeurs de ρ_0 et a du tungstène ont été déterminées par H. Pécheux; C. R. Acad. Sciences, septembre 1918.)

Or, il est facile de vérifier que si : R est la résistance d'un filament, quand la résistivité est ρ, et si R_0 est celle qui correspond à ρ_0, l'on a : $\frac{R}{R_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$. En résumé, l'on aura : *tungstène pur* : $\frac{R}{R_0} = 12{,}88$ (2.200°), et 15,04 (à 2.600°); *tungstène ferreux* : $\frac{R}{R_0} = 11{,}56$ (2.200°); et 13,48 (à 2.600°). Ces nombres sont confirmés par les *essais* des divers types de lampes (voy. § D. Essais des lampes); les valeurs trouvées montrent bien *le régime de température* des lampes, et la nature du métal employé, comme nous le verrons.

Il résulte, de ce qui vient d'être établi, que la résistance d'une lampe au tungstène étant plus faible à froid (quand on commence à fermer le circuit), le courant est plus grand que sous le régime normal ; il va

diminuer graduellement, au fur et à mesure que le régime s'établira : la lampe au tungstène sera donc *autorégulatrice* et sera peu sensible aux variations de tension ; une *surtension* aura moins d'effet que sur la lampe au carbone, il y aura *peu d'intérêt à la pousser*.

N. B. — L'adjonction d'un *autre métal* au tungstène, modifie la valeur de la constante $\frac{R}{R_0}$; ainsi le zirconium a pour effet d'abaisser les valeurs précédentes à *10*,7 ou *10*,*6* ; la détermination de ce coefficient $\frac{R}{R_0}$ pour chaque type de lampe, renseigne donc exactement sur la nature du filament (H. Pécheux).

Nous verrons plus loin (Essais des lampes), comment on détermine la *température* du *filament ;* la lumière émise est d'autant plus *blanche* que la température est plus élevée : dans un gaz inerte, elle sera plus blanche que dans le vide.

Les *pertes de chaleur* avec le filament dans *le vide*, sont aussi faibles qu'avec la lampe au carbone ; avec un *gaz inerte*, il se produit une *convection* à l'intérieur de l'ampoule, d'où échauffement du verre, et perte appréciable par conductibilité, à l'air extérieur. En donnant comme on le fait, au filament, la forme ramassée d'une hélice à spires serrées, la perte de chaleur devient 7 fois moindre environ qu'avec un filament à brins rectilignes (zig-zags) ; de plus, les lampes ont un *long col*, dans lequel viennent se déposer les *produits volatils*, et où le noircissement se produira, loin de la portion éclairante de l'ampoule.

38. **Electrovaporisation.** — Elle a lieu comme dans les lampes au carbone, mais elle est *plus lente* (la masse atomique du métal étant très élevée : 184) ; elle croît avec la température ; mais dans les lampes à atmosphère gazeuse, l'introduction du gaz (lequel se trouve porté à une *pression* assez élevée) tend à s'opposer à cette électrovaporisation, et l'on ne constate qu'un *très lent* noircissement de l'ampoule.

39. **Emission électronique.** — Elle peut être vérifiée *expérimentalement* comme pour le filament de carbone (voy. § 29 ; fig. 10) ; elle est fonction de la température du filament, et d'autant *plus intense* que le vide est *plus poussé*.

Richardson a, le premier en 1903, étudié l'émission électronique des métaux dans le vide à une température variant de 2000° à 2600° ; *Langmuir* a vérifié en 1913 l'exactitude de sa théorie, en employant une lampe à incandescence renfermant 2 filaments de *tungstène* indépendants, l'un froid servant d'anode, l'autre *au rouge* servant de cathode (elle est maintenue incandescente par un courant électrique spécial, dit : *de chauffage*) ; le vide dans l'ampoule était de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} millimètre de mercure (vérifié, avant la fermeture, à l'aide d'un tube de Crookes, ou mieux, à l'aide du *manomètre* de la fig. 145 (voy. Chap. IV).

Quand un métal est chauffé jusqu'à l'incandescence, les électrons négatifs libres qui circulent normalement entre les molécules du solide jouant le rôle de cathode, prennent une vitesse suffisante pour que certains d'entre eux sortent du métal : ils sont alors captés par un champ électrique de sens positif créé par une anode, et il y a *émission*, donc *courant électronique* entre les 2 électrodes.

Mais le courant électronique en question n'est pas seulement *fonciton de la température*, il dépend aussi de la *différence de potentiels* entre l'anode et la cathode, comme l'a montré Langmuir.

Et l'on en trouve la preuve dans le fait qu'une lampe ordinaire à incandescence au tungstène dans le vide (filament en zig-zags ; voy. ci-après § 40, Construction des lampes) ne donne lieu, contrairement à ce que l'on pourrait supposer *a priori*, à aucun courant électronique entre les brins d'arrivée (anodique) et de sortie (cathodique) du filament ; bien qu'il règne entre ces brins, dans une lampe ordinaire, une tension de 110 volts : c'est que la cathode produit plus d'électrons que n'en pourrait entraîner l'anode ; il en résulte une pression des électrons libérés, sur ceux qui les suivent, et qui s'oppose à une émission durable.

Nous allons donc examiner le phénomène d'émissions des électrons dans les lampes à 2 électrodes.

α) *Emission à température constante.* — Le courant électronique I *croît*, d'abord, *avec la différence de potentiel* E entre les électrodes, selon la loi de Langmuir, et à une *température donnée* :

(20) $I = KE^{3/2}$, dans laquelle K est une constante qui ne dépend que de la *nature* du métal, de la masse et de la charge d'un électron, et de la *distance* des électrodes; si E est en *volts* et I en milliampères par centimètre carré de cathode, on a, avec deux électrodes planes et parallèles de tungtène, dans le vide à 10^{-6} millimètre de mercure, $K = \frac{2,33 \times 10^{-3}}{d^2}$; *d* étant la distance en centimètres de ces électrodes; avec une *anode* cylindrique de rayon *r* et un filament de tungstène (cathode) tendu suivant son axe, on a : $K = 14,65 \times \frac{10^{-3}}{r}$; lorsque la tension E a acquis une certaine valeur pour la température T (absolue) considérée (*tension critique*), l'intensité du courant électronique prend une *valeur constante* I_0 même si l'on continue à faire croître la tension; on dit que l'on a un courant de saturation ; et sa valeur est donnée par la formule de Richardson (rapportée à 1 cm^2 de cathode) :

(21) $I_0 = A\sqrt{T} \times e^{-\frac{b}{T}}$; dans laquelle la constante A dépend du nombre d'électrons émis par centimètre-carré de cathode, et aussi de la charge d'un électron ; *b* est une constante qui dépend de l'énergie nécessaire pour libérer un électron de la cathode ; *e* est la base des

logarithmes népériens. Pour le *tungstène*, on a : $A = 23{,}6 \times 10^{-9}$; $b = 52{,}5 \times 10^{-3}$: cette formule montre que l'intensité du courant électronique croît considérablement avec la température absolue T de la cathode ; — ceci, pour le vide de 10^{-6} millimètre de mercure. La fig. 19 montre la courbe OMC représentative de I, et de I_0 ; de O en M, elle représente l'intensité I (formule 20); la portion rectiligne MC est le courant I_0 de saturation (formule 21) ; cette courbe correspond à $T = 2300°$; la tension critique vaut : $Om = 130^v$; le courant de saturation : $I_0 = 150$ milliampères.

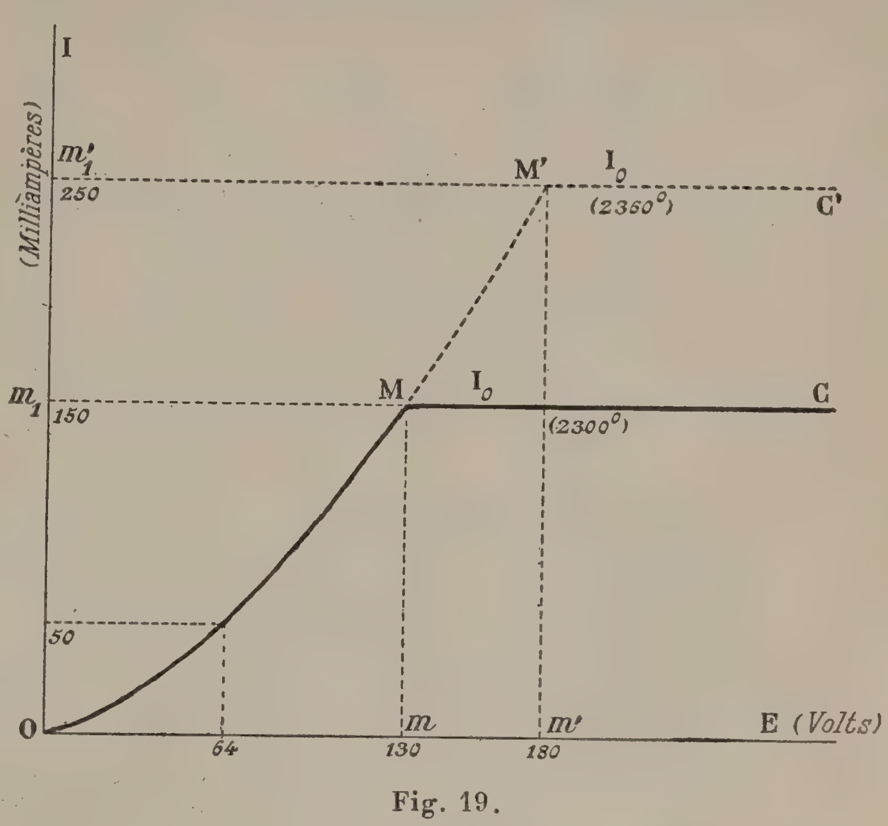


Fig. 19.

Pour toute la cathode, de surface *s* cent. carrés, le courant de saturation vaut : $I' = I_0 \times s$.

Ce phénomène s'*explique ainsi :* malgré l'accroissement de la tension entre l'anode et la cathode, les électrons libérés s'accumulent entre les électrodes, et exercent sur les électrons qui les suivent une pression dite de saturation, qui arrête l'émission ; — les électrons libres se comportent donc comme une vapeur saturante, et l'émission électronique rappelle la vaporisation d'un liquide, à une température donnée.

β) *Emission à température variable.*— Si l'on augmente la température de la cathode (en faisant croître l'intensité du courant qui la maintient à l'incandescence), la même série de phénomènes se reproduit ; l'intensité I va croître, cette fois, en suivant la même loi (formule 20), jusqu'à une tension E supérieure à la précédente, et la tension critique (de saturation) s'élèvera de la valeur précédente Om à une nouvelle valeur Om', on aura la courbe ; OMM' ; pour cette nouvelle tension et cette nouvelle température $(T + \theta)$, le courant de saturation vaudra :

$Om'_1 = I_0 = A\sqrt{(T + \theta)} \times e^{-\frac{b}{T+\theta}}$; dans le cas de la figure, on a : tension critique : $Om' = 180$ volts ; et : $I_0 = 250$ milliampères ; $T + \theta$

=2360°. L'on conçoit que, avec une nouvelle température plus grande encore, on obtiendra une nouvelle courbe de même allure.

N. B. — Nous reviendrons sur l'émission électronique à propos des *kénotrons* et des *lampes triodes* (pour T. S. F.), et nous verrons comment l'adjonction d'une 3e *électrode* modifie la forme des courbes du courant électronique, en fonction de la température de la cathode, et de la tension entre anode et cathode. (Voy. Chap. IV).

N. B. — Nous parlerons plus loin (Chap. IV) de l'émission électronique du *molybdène* et du *thorium*.

40. **Construction des lampes à filament de tungstène.** — Nous distinguerons 2 cas : I) *lampes à vide ;* II) *lampes à atmosphère gazeuse.*

I) **Lampes à vide.** — *a*) **Constitution type.** — Le filament F de tungstène (nous avons donné ses dimensions extrêmes au § 37) est enfermé dans une ampoule A de verre (fig. 20) en forme de poire, où le vide existe au $\frac{1}{1000}$ de millimètre de mercure; les bouts de ce fil (lequel est en forme de zig-zags) sont soudés à 2 fils de nickel α ; puis ceux-ci, à 2 fils courts de platine *p*, soudés eux-mêmes à 2 cordons de cuivre β qui servent d'entrée et de sortie du courant. Le culot, en laiton, est construit comme nous l'avons vu pour la lampe au carbone, à baïonnette (cas de la fig. 20), ou à vis (grosses intensités).

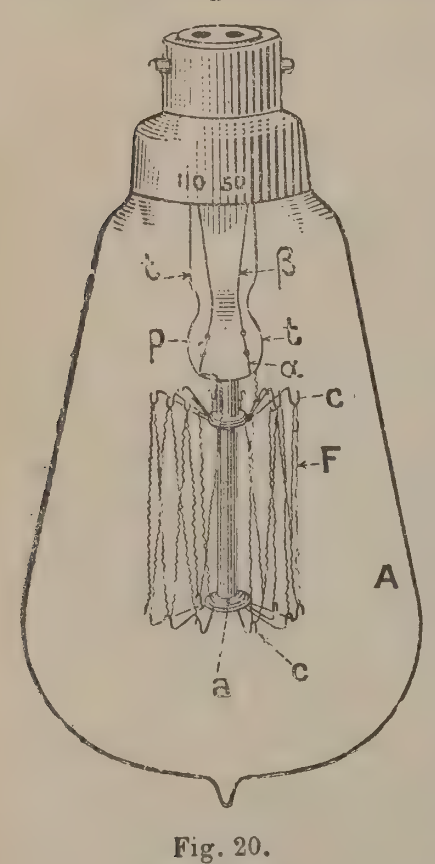


Fig. 20.

Le filament est enroulé autour d'un petit tube de verre **a** (terminé par 2 boutons) et soutenu, aux coudes, par des crochets (*huit*, généralement) en *molybdène c*, fixés horizontalement aux boutons du tube **a**, et comme une armure de parapluie); ces crochets, non soudés au filament, permettent sa libre dilatation à l'incandescence ; le filament est pincé, à ses extrémités, par les crochets des cordons de nickel α; — les fils de platine *p* (3 à 4 m/m de long) et les cordons de cuivre (5 à 6 c/m de long), sont serrés par l'extrémité aplatie d'un petit tube de verre *t*, soudé à l'ampoule, près du culot; seuls les fils de platine sont emprisonnés dans le verre du tube *t* (ayant même coefficient de dilatation que ce métal). On remplace le platine très coûteux par un alliage de *même coefficient* de *dilatation* (acier au nickel, à 30 % de nickel) chez certains constructeurs de lampes. (Cie des lampes-métal).

Le *culot*, et la *douille*, sont les mêmes que pour la lampe au carbone.

41. *b*) **Construction de la lampe.** — Elle comporte la *préparation* du filament ; sa *mise en place* sur les armures (fabrication du *pied*) ; la

soudure, à l'ampoule, du *pied* en question ; l'*opération du vide ;* l'*achèvement de la lampe;* la *vérification.*

1° Préparation du filament. — Le tungstène s'extrait du *Wolframm*, minerai renfermant l'oxyde $T\mathit{u}O^3$ allié à de faibles proportions d'oxydes de fer et de manganèse, et que l'on purifie *chimiquement* pour le débarrasser des métaux étrangers, et de la silice ; on dessèche à 1400° la poudre d'acide tungstique obtenu pur, et on réduit par l'hydrogène à 1300° dans des tubes en porcelaine ; — on prépare encore le tungstène par *électrolyse* de l'acide tungstique en solution alcaline, avec la soude par exemple, en le disposant dans le compartiment cathodique d'une cuve électrolytique ; — la poudre de tungstène obtenue est placée dans un moule prismatique en acier, où elle est comprimée à la presse hydraulique ; on obtient une barre prismatique carrée d'un centimètre carré de section, et de 10 c/m de longueur, très consistante, que l'on dispose entre les électrodes d'un four électrique, où elle est soumise pendant une heure, à une température supérieure à 3000° centigrades, et dans une atmosphère d'hydrogène qui empêche l'oxydation : la barre acquiert ainsi une grande dureté, et ses particules sont soudées comme si elle avait été obtenue par fusion. On la porte au rouge-blanc et on la soumet au martelage automatique, qui l'allonge et la façonne en un gros fil de quelques mètres de longueur. On passe, après une nouvelle chauffe, dans une série de filières en diamant chauffées au rouge, le gros fil en question enduit de graphite et chauffé au rouge sur une rampe à gaz ; après 200 passes environ dans des filières de plus en plus petits diamètres, on obtient le calibre que l'on désire pour telle intensité lumineuse voulue (on peut aller jusqu'au diamètre 10μ).

On coupe, à la longueur voulue, le fil destiné à une lampe, et on lui donne la forme en zigzags, en l'enroulant sur les crochets d'une tige semblable à celle des lampes (tige matrice) ; on lancera un courant électrique dans ce filament, alors qu'il est sous une cloche à hydrogène, afin de le ramollir un peu, ce qui lui permettra de conserver, au refroidissement, la forme qui lui a été donnée.

Fig. 21.

42. 2° Fabrication et montage du pied. — On façonne un tube de verre assez mince *f* (fig. 21) en le tournant sur lui-même pendant que son extrémité inférieure est exposée à la flamme d'un chalumeau qui le ramollit : on l'évase à l'aide d'une tige métallique (en *g*) ; on enfonce

ensuite, à la partie supérieure du tube *f*, une tige pleine (plus mince) de verre : *a*, pourvue d'une perle en *b* (qui servira à limiter son engagement dans le tube creux *f*), après avoir introduit les électrodes.

Les électrodes d'amenée du courant sont formées de 3 cordons : nickel *c*, platine *d* (3 m/m de long seulement), et cuivre *e* que l'on soude bout à bout, électrolytiquement, et au cuivre; on introduit les électrodes dans le tube *f*, le nickel en haut, de façon à ce que les fils de platine se trouvent entre la partie supérieure de *f* et le bout de la baguette *a* situé au-dessous de la perle *b*. On chauffe au chalumeau la région au-dessous de *b*, afin de ramollir l'extrémité inférieure de *a* et l'extrémité supérieure de *f*, et l'on aplatit cette partie commune, afin d'emprisonner les fils de platine seuls dans le verre (nous avons dit pourquoi antérieurement) ; le *pied* (fig. 22) de la lampe est terminé ; il ne reste plus qu'à l'armer du filament.

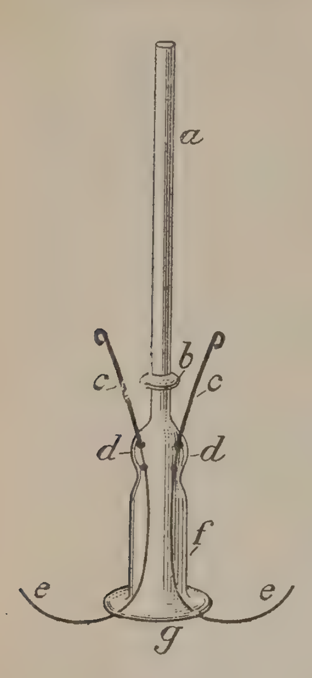
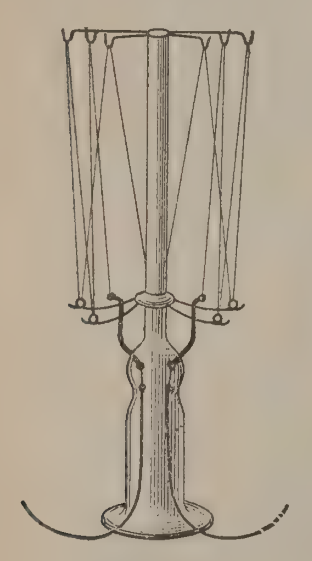


Fig. 22.

N.B. — Dans les lampes Mazda, les électrodes sont d'une seule pièce, et faites d'un alliage (*dumet*) ayant même coefficient de dilatation que le platine.

43. 3° **Montage du filament.** — On soude, aux extrémités de la tige *a*, les crochets en molybdène terminés par des boucles, et l'on pose le filament, préparé antérieurement, sur les extrémités de ces crochets ; les extrémités libres du filament sont alors soudées aux extrémités des cordons de nickel des électrodes ; le dispositif est celui de la fig. 23.

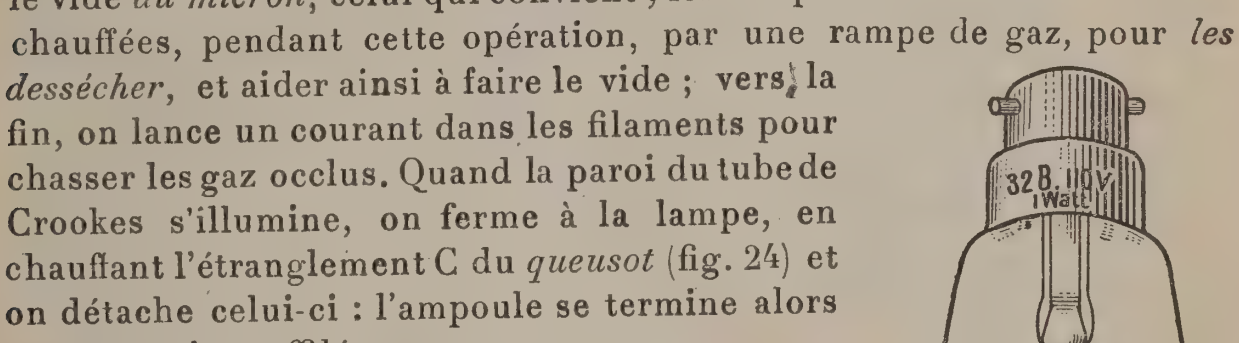

Fig. 23.

On vérifie le bon calibrage du filament, en même temps que les contacts et soudures, en disposant la monture sous une cloche d'hydrogène, et en envoyant un courant électrique, par les électrodes, pendant quelques secondes.

44. 4° **Soudure de l'ampoule; opération du vide.** — On introduit alors le pied pourvu de son filament, dans une ampoule A ayant la forme de la fig. 24 : cette ampoule est pourvue, dans le haut, d'un tube mince *l* qui a été soudé au préalable (le *queusot*) et en bas, d'un col large G ; la partie évasée *g* du pied étant maintenue contre la partie étranglée du col G, on chauffe au chalumeau pendant que l'ensemble tourne sur lui-même ; le verre se ramollit, et la soudure du col G au pied s'effectue : la lampe est fermée par la partie inférieure : seuls, les cordons en cuivre des

électrodes sortent du tube *f* (emprisonné maintenant dans l'ampoule), et l'ampoule n'est plus ouverte que par le *queusot*.

On fixe la lampe (avec un grand nombre d'autres lampes semblables) par le *queusot*, à l'aide d'une garniture de caoutchouc armé, à un tuyau collecteur en relation avec une série de pompes à huile à *faire le vide* (les pompes Fleuss, à 2 pistons, mues rotativement, donnent rapidement le vide à 1 micron de mercure) et avec une trompe à mercure. Le vide doit être inférieur au *micron* (en hauteur de mercure); il est évident qu'une telle pression ne peut être indiquée par un tube manométrique; on se sert comme indicateurs du vide, d'une série de tubes, depuis le tube de Geissler jusqu'au tube de Hittorf, ou mieux encore au tube de Crookes qui peut remplacer ce dernier; ces tubes ne sont pas fermés entièrement, mais reliés également par leurs *queusots*, au tuyau collecteur allant aux pompes à huile; ces tubes sont actionnés par les décharges d'une bobine de Ruhmkorff; quand le tube de Geissler cesse de s'illuminer, on atteint le vide de 10 microns; un peu après, le tube de Crookes fournit sa *fluorescence caractéristique :* on a alors atteint le vide *au micron*, celui qui convient; les lampes sont chauffées, pendant cette opération, par une rampe de gaz, pour *les dessécher*, et aider ainsi à faire le vide; vers la fin, on lance un courant dans les filaments pour chasser les gaz occlus. Quand la paroi du tube de Crookes s'illumine, on ferme à la lampe, en chauffant l'étranglement C du *queusot* (fig. 24) et on détache celui-ci : l'ampoule se termine alors par une pointe effilée.



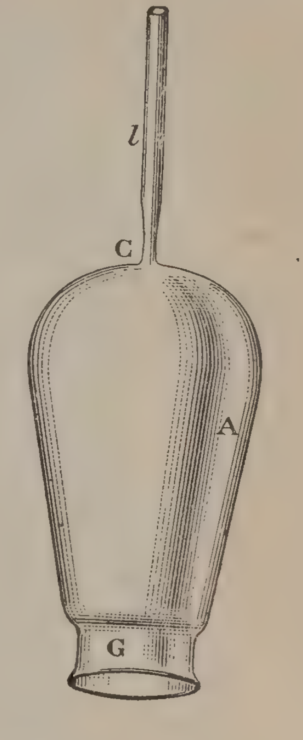


Fig. 24.

45. 5° **Achèvement de la lampe; vérification.** — On passe la lampe au banc photométrique (comme nous l'avons indiqué au § 35, pour la lampe au carbone); si elle est reconnue *bonne* on fixe le *culot*, comme nous l'avons dit au § 34 : il n'y a rien de plus à ajouter.

On vérifie les lampes en les allumant, par groupes de 50 ou de 100, sur une *rampe d'essai*; on constate le bon calibrage des filaments (aux lunettes noires), et l'on vérifie la bonne tenue des lampes, sur le courant, et sous la tension normale bien réglée, pendant une dizaine d'heures. Ou grave, sur le culot, l'intensité lumineuse horizontale, et la tension normale (p. exem-

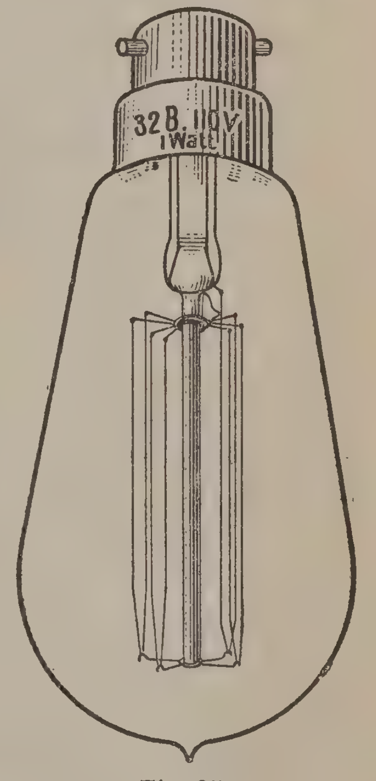


Fig 25.

ple : 32 bougies ; 110 volts) ; la fig. 25 montre l'aspect d'une lampe terminée, et prête à être livrée au commerce.

N. B. — Dans les lampes Mazda, un produit chimique (*getter*) déposé au préalable sur le filament, rendra le vide plus parfait ; au moment du 1er allumage, ce produit absorbe les dernières traces de gaz.

46. II. **Lampes à atmosphère gazeuse.** — *a*) **Constitution-type.** — Dans ces lampes, qui renferment une atmosphère d'*argon* (jusqu'à 100 bougies), ou une atmosphère d'*azote* (pour de plus grandes intensités), — nous avons dit les avantages de ces lampes aux § 37 et 38, — l'ampoule est *sphérique* (fig. 26) ; le filament *amb*, en tungstène, est formé de spires très serrées, et présente l'aspect d'une ligne polygonale (à 4,6,8 côtés) dont les côtés sont infléchis en forme de chaînettes ; il est raccordé, à ses extrémités, à 2 crochets **a**, *b*, par lesquels se terminent les cordons *f* en nickel, soudés dans la partie étranglée du tube $\beta\gamma$ aux 2 fils courts de platine (ou d'acier au nickel à 30 % de nickel) *g* ; ceux-ci sont soudés eux-même aux cordons de nickel, ou de maillechort *h* qui aboutissent aux pastilles : *p*, *r* du culot. L'armure qui soutient, par ses crochets, le filament de tungstène est formée de fils de molybdène : *c*.

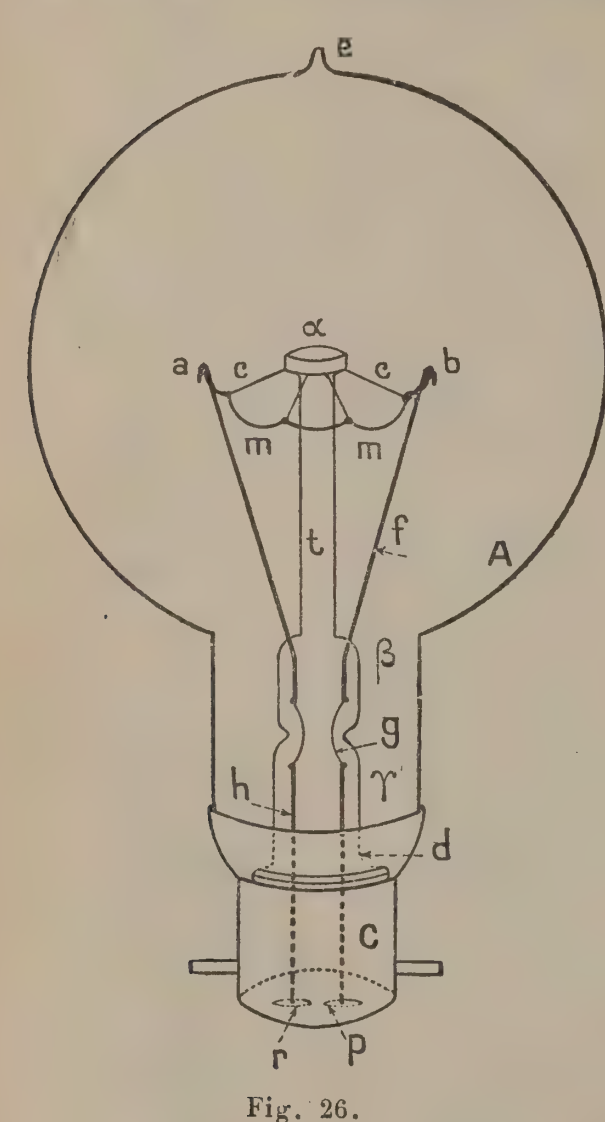


Fig. 26.

Nous avons donné la raison de cette forme de filament ; son diamètre est plus gros que celui des lampes dans le vide (quelques dixièmes de millimètre) ; la longueur est variable avec l'intensité lumineuse.

46 *bis*). **Construction de la lampe.** — Le filament, ayant le diamètre et la longueur voulus (correspondants à l'intensité lumineuse adoptée *a priori*), est enroulé en hélice, sur un mandrin chauffé ; et pendant qu'il est placé dans une atmosphère d'hydrogène, on le porte à l'incandescence pour vérifier le calibrage ; on le monte ensuite sur un pied matrice en attendant son montage sur le pied de la lampe.

On prépare le *pied* de celle-ci, absolument comme celui d'une lampe à vide ; mais le col de la lampe devant être assez long (nous avons

dit pourquoi), le tube βγ devra avoir une longueur égale à celle du col.

Le montage du filament sur la potence α portant les crochets de molybdène étant effectué, on introduit le pied monté dans l'ampoule, et l'on soude le pied comme nous l'avons dit.

Les lampes sont mises en communication par le queusot des ampoules (en *e*) avec les pompes à faire le vide, pendant qu'elles sont desséchées par une rampe à gaz qui les chauffe extérieurement ; et, après évacuation des gaz occlus (par l'incandescence du filament), on laisse rentrer de l'argon, ou de l'azote bien secs, — à une pression, indiquée par un manomètre à mercure, qui ne dépasse pas 2/3 d'atmosphère à froid. On ferme la lampe en *e*, comme il a été dit déjà, et l'on fixe le culot.

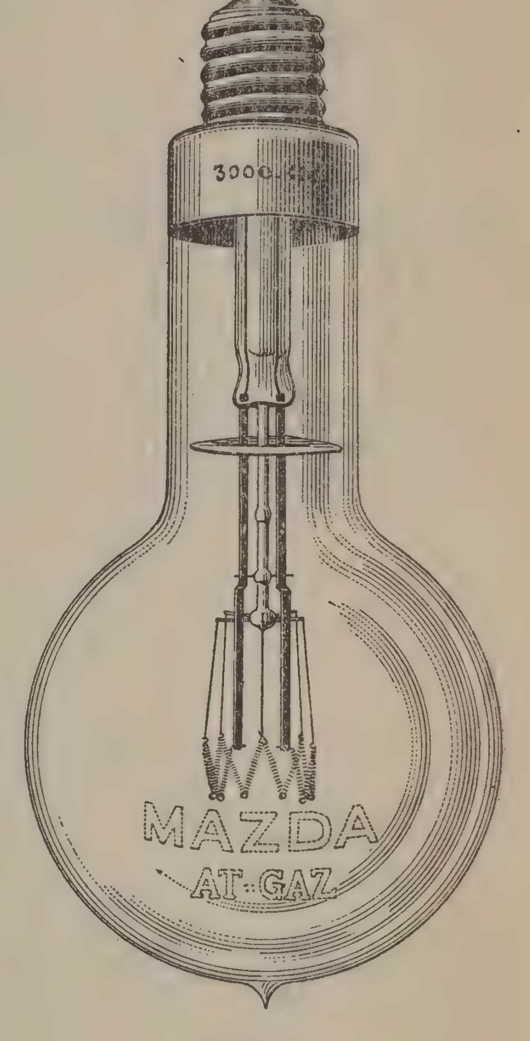


Fig. 27.

Pour les lampes de *grandes intensités lumineuses*, le filament, *plus gros*, enroulé en spires très serrées, a l'aspect d'une *ligne polygonale plane* (type Philips) ou en zig-zags à cordons courts (type Mazda, fig. 27) (ce qui aura pour effet une distribution un peu différente de la lumière autour du foyer). De plus, un disque de *mica* est interposé dans le col (fig. 27), pour arrêter les particules dues à l'électro-vaporisation et les radiations calorifiques intenses qui échaufferaient le tube à électrodes, et provoqueraient des dilatations dangereuses pour l'étanchéité des ampoules.

N.B. — Nous indiquerons (§ D.6°) quelques *dispositifs* de lampes à *grandes intensités lumineuses*.

C. — LAMPES A FILAMENT D'OXYDES RARES

47. **Propriétés du filament d'oxydes.** — Un filament obtenu à l'aide d'une pâte d'oxydes rares (zircone, cérine, thorine), additionnée de 20% de son poids d'oxyde d'erbium, de didyme ou d'yttrium, porté à l'incandescence *dans l'air*, à une température voisine de 1950° (même 2300° dans les lampes intensives) donne une grande quantité de radiations sélectives. Son coefficient de température est *négatif*, — comme celui du carbone —; donc la résistance diminue, mais seulement à partir

de 600°, et quand le filament s'échauffe; à l'incandescence, elle est très faible, et varie sensiblement avec la tension aux bornes (elle *n'est pas autorégulatrice*). A la température de 1950° centigrades, le filament présente un grand *éclat* : 500 bougies-centimètre-carré (Ives et Luckiesch). Mais il y a naturellement d'assez grandes pertes de chaleur à l'air libre (par *convection* d'abord, par *ionisation* de l'air ambiant ensuite); aussi le *rendement* n'est-il pas très élevé. On n'a pu réussir à faire fonctionner le filament dans le vide. — Cette lampe, dûe au Dr Nernst, est construite exclusivement par la Société A.E.G. de Berlin.

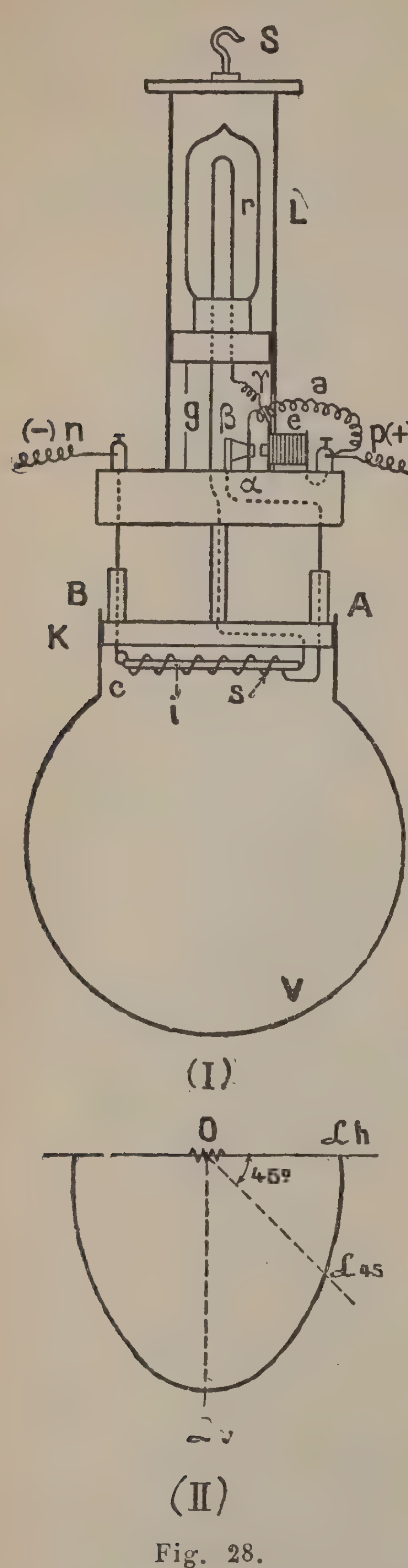


Fig. 28.

48. **Constitution-type d'une lampe Nernst.** — Il existe 2 types de lampes Nernst, le type A et le type B.

1° *Type A*. Elle se compose d'un filament ou bâtonnet *i* (fig. 28; (I), appliqué contre un disque en kaolin K, disposé en *série* avec une *résistance compensatrice r*, en fil de fer très fin renfermé dans une ampoule L contenant de l'hydrogène, et avec le fil d'une bobine d'électro-aimant *e*; l'ensemble est disposé entre les bornes *p* (+) et *n* (—).

Comme le bâtonnet ne commence à être conducteur qu'au rouge sombre (600°) il faut le munir d'un calorifère électrique, constitué par une spirale de platine (ou d'acier au nickel) *s* enduite de kaolin, et disposée elle-même entre les bornes *p* et *n*, étant en *série* avec une résistance métallique faible a, un contact oscillant de fer doux α, un contact de cuivre β, et un fil conducteur qui relie β à la spirale par le petit manchon A (dont il est isolé électriquement); en somme, il y a 2 *circuits* en *dérivation* entre *p* et *n* : le système : bâtonnet-résistance *r* bobine d'électro ; et le système : spirale *s*-résistance a. Un globe de verre V entoure le bâtonnet, qui se trouve à la partie supérieure; un manchon métallique entoure la lampe compensatrice et l'électro-aimant; un crochet S permet de suspendre la lampe, laquelle ne peut, on le conçoit aisément, éclairer utilement que dans la position de la figure.

Voici maintenant son fonctionnement : on établit le courant (sous 100 à 110 volts) entre p et n; le bâtonnet (à froid) présentant une très grande résistance, tout le courant passe alors par la spirale s, laquelle ayant un pouvoir émissif faible, s'échauffe rapidement jusqu'à l'incandescence (le platine est *inoxydable* au rouge) ; le kaolin qui l'enrobe est bientôt porté à l'incandescence, et échauffe le bâtonnet ; dès que celui-ci a atteint le rouge sombre, — au bout de quelques secondes, — il devient *meilleur conducteur* que le platine (beaucoup plus résistant, d'ailleurs, au rouge qu'à froid, comme tous les métaux), — et le courant passe *presque entièrement* par le circuit : (p-e-γ-r-g-i-n); le flux magnétique créé par ce courant dans le noyau de l'électro-aimant attire le contact en fer doux α, et le circuit du platine se rompt entre α et β : le courant passe entièrement par le bâtonnet i,qui est porté au rouge blanc.

Le rôle de la résistance r est aisé à comprendre; quand il y a *surtension* sur le circuit, le courant croît en i, ainsi que la température du circuit; et la résistance du bâtonnet *diminue*; mais celle du fer r *augmente* ; et si le constructeur a bien calculé la compensation, la résistance de l'ensemble sera sensiblement constante, et la lampe sera auto-régulatrice. Le fil r peut être porté au rouge, étant dans une atmosphère d'hydrogène (incomburante.)

49. **Construction de la lampe.** — Elle comprend : la fabrication du bâtonnet, celle de la lampe-régulatrice L, celle de l'électro-aimant e, celle la spirale s.

1° *Bâtonnet.* — On l'obtient en partant d'une mèche serrée de coton, que l'on trempe dans un mélange de solutions neutres d'azotates (de zirconium, de thorium, de cérium et d'erbium ou d'yttrium) ; au bout de 2 heures, on comprime cette mèche pour chasser l'excès de liquide, et on l'étend dans un moule ayant la forme voulue (rectiligne dans le type A, en boucle dans le type B dont nous parlerons ensuite); on comprime encore au moule, et l'on dessèche à 70°; la mèche a pris une certaine consistance : on la brûle alors (il faut 1 minute environ pour la combustion du coton) :il reste un squelette d'oxydes rares dûs à la dissociation des azotates; on recuit le bâtonnet obtenu au moule, et pendant 3 heures, dans la flamme d'un chalumeau : les oxydes deviennent pâteux et se mélangent en formant une masse homogène.

Pour de plus grosses intensités lumineuses, — il faut des bâtonnets plus épais, — on fait d'abord une pâte d'oxydes (par dissociation d'une solution des azotates), on moule cette pâte, on la comprime, et on la recuit au *moule* jusqu'à fusion pour la rendre homogène.

2° *Lampe compensatrice.* — Elle se construit comme une lampe métallique en atmosphère gazeuse; l'hydrogène sec est introduit à une pression voisine de 2/3 d'atmosphère ; on la munit d'un culot à brides; elle s'adapte à baïonnette sur la douille qui est reliée, par ses deux

bornes au fil g et au fil γ (fig. 28); cette lampe a été essayée, au préalable, sous le courant de régime du bâtonnet afin de juger du bon calibrage du filament en boucle r et des contacts avec la douille.

3° L'*électro-aimant* est calculé pour fournir l'attraction suffisante du petit marteau de fer doux α (Voy. *Traité d'Electricité*; *H. Pécheux*; calcul d'un électro-aimant, pour une force attractive donnée); — la spirale s est calculée pour rougir (1400°) sur le courant initial (formule 11; § 23).

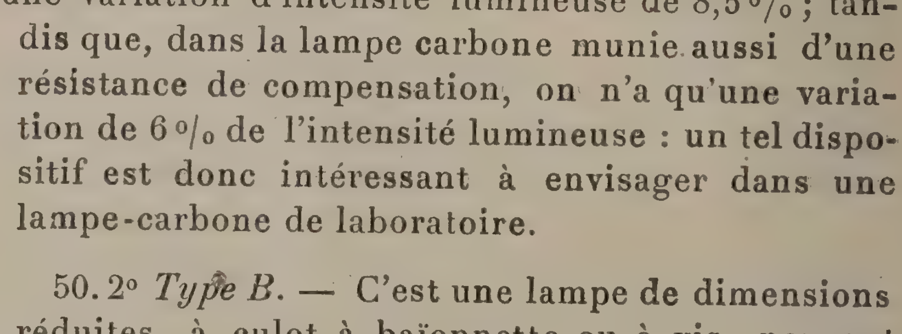
Les *goujons* B, A sont portés par la plaque K à laquelle sont fixés la spirale s et le bâtonnet i; les extrémités de s sont soudées à la base des goujons; l'extrémité c du bâtonnet l'est au goujon B; l'autre extrémité l'est à un goujon axial porté par K, et cette plaque recevra les tiges-électrodes fixées aux bornes p, n.

Enfin, le *globe opalin* V est fixé ensuite, à la plaque K, par des vis de serrage.

On fait l'essai photométrique de la lampe, comme nous l'indiquerons au paraphe D. Cette lampe est dite : *intensive*.

4° Remarque. — On a essayé récemment d'appliquer à la *lampe au carbone* (qui se comporte comme la lampe Nernst sur un réseau) une résistance de compensation (fil fin de fer dans une ampoule d'hydrogène); on a comparé les résultats obtenus à ceux que donne la lampe Nernst. Voici quelques nombres fournis par l'expérience :

Pour une *surtension* de 1 % seulement aux bornes de la lampe Nernst, on obtient une variation d'intensité lumineuse de 8,5 %; tandis que, dans la lampe carbone munie aussi d'une résistance de compensation, on n'a qu'une variation de 6 % de l'intensité lumineuse : un tel dispositif est donc intéressant à envisager dans une lampe-carbone de laboratoire.



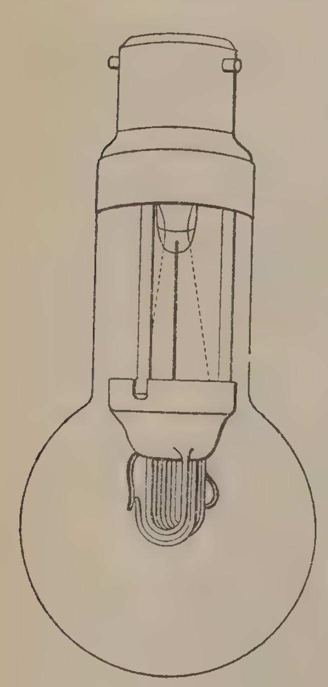


Fig. 29.

50. 2° *Type B*. — C'est une lampe de dimensions réduites, à culot à baïonnette ou à vis, pouvant se placer sur n'importe quelle douille de lampe à incandescence ordinaire (fig. 29); le filament-bâtonnet, préparé comme celui du type A, est en boucle, avec une spirale de platine chauffante enroulée en 6 zig-zags et appliquée entre la plaque de kaolin verticale qui supporte le bâtonnet; l'électro, et la résistance de compensation sont logés dans le culot, dont les pastilles constituent les bornes de la lampe.

Ces lampes se font pour réseau continu ou alternatif, de 220 à 330 volts; la lampe à 260 volts a un filament de 22 m/m de longueur, et $\frac{35}{100}$ m/m de diamètre; le globe opalin qui l'entoure (non étanche, puisque l'incandescence a lieu à l'air) s'ajoute à la plaque supé-

rieure servant de base au culot; la résistance du fil compensateur vaut 102 ohms 5.

D. — ESSAIS DES LAMPES A INCANDESCENCE

51.—L'essai d'une lampe à incandescence comprend la détermination : I° de ses *constantes électriques* (*tension* normale, *courant* d'alimentation; *résistances*, à 0° et sous la tension normale, et *rapport* de ces résistances; *puissance* électrique consommée; II° de ses *constantes calorifiques* (*température* du filament ; *rendement lumineux*); III° de ses *constantes lumineuses* (*intensités lumineuses*, horizontale et moyenne sphérique; *flux* lumineux; IV° des *constantes électro-optiques* (relation entre la *tension électrique* et l'*intensité lumineuse*; *consommation spécifique*); V° de sa constante *de durée*.

I. — Constantes électriques

52. Nous allons déterminer, pour un type de lampe quelconque, la tension aux bornes : E (en volts), et l'intensité du courant : I (en ampères), lorsqu'elle fonctionne au *régime normal* d'éclairage (celui pour lequel elle fournit l'intensité lumineuse L gravée sur le culot); de la connaissance de E et I nous déduirons : la puissance électrique consommée : $P_n = EI$ watts en régime normal; et aussi, comme le filament transforme exclusivement l'énergie électrique en chaleur et lumière, la résistance normale : $R_n = \frac{E}{I}$.

En faisant varier E (à partir de valeurs faibles jusqu'à la valeur normale), le courant I variera lui-même ; un *graphique* qui traduira ces variations de E en fonction de I donnera une idée nette de la façon dont se comporte le filament au fur et à mesure qu'on le pousse vers l'incandescence; 2 graphiques voisins (obtenus avec 2 lampes), permettront de les différencier; ce graphique porte le nom de *caractéristique* du fonctionnement électrique de la lampe.

53. *a*) **Relevé d'une caractéristique.** — Pour opérer un tel relevé, il faut *mesurer* certaines valeurs de E et de I correspondantes ; puis on portera, sur 2 axes de coordonnées rectangulaires, et à une échelle donnée, en abscisses les intensités (en ampères), et en ordonnées les tensions aux bornes (en volts).

1° *Dispositif de mesures.* — Pour faires les mesures des *constantes électriques*, et évaluer les diverses valeurs de E et I avant le régime normal, l'on emploie le dispositif suivant (fig. 30) : entre 2 bornes de prises de courant (continu, par exemple) où l'on dispose d'une tension constante E′ supérieure à celle du régime normal de la lampe, on ins-

talle un rhéostat de réglage Rh, avec curseur p; un ampèremètre A avec son shunt S, la lampe à essayer L, et un voltmètre V; celui-ci est en dérivation entre b et f, sur la série ampèremètre-lampe ; par le curseur p, on introduit telle résistance voulue de Rh, et l'on obtient un courant d'intensité I' par exemple, qui se dérive en b, entre un courant d'alimentation de la lampe : I, et un courant dérivé *négligeable* en V, vu la grande résistance du voltmètre. En disposant le curseur p à droite (près de a') on introduit une grande résistance, et l'on obtient une grande chute de tension de a en p, donc une tension faible E aux bornes du circuit (lampe-ampèremètre) ; au contraire en déplaçant p sur la gauche, on *enlève* des résistances; quand p est en a, la tension E est égale à E'.

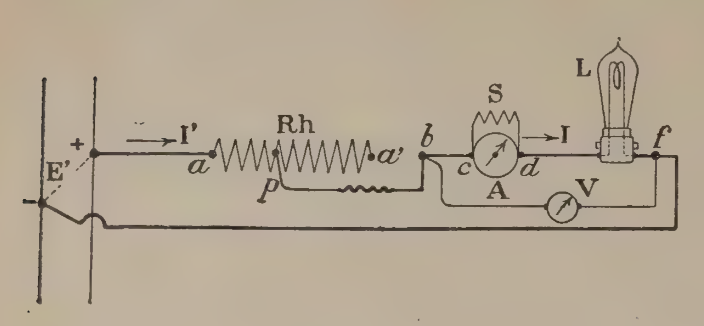


Fig. 30.

Pour *relever* la *caractéristique*, on déplacera *graduellement* p de droite à gauche, et on lira, à chaque position : I et E (respectivement sur A et V; on s'arrêtera quand E, lue sur V, sera égale à la tension indiquée sur le culot (tension normale).

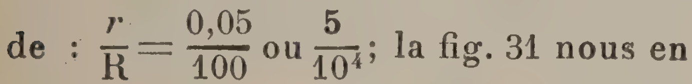
On voit aisément, à l'aide de la figure, que l'on a, pour une position quelconque du curseur :

(22) $E' = I'Rh + I\left(\frac{AS}{A+S} + R\right)$; $\frac{AS}{A+S}$ est la résistance du dispositif ampèremètre-shunt (loi de Kirchhoff), R est celle de la lampe; quand Rh diminue, I'Rh diminue (bien que I' augmente), et le terme : $I\left(\frac{AS}{A+S} + R\right)$ qui est égal à E, augmente.

N. B. — On peut évaluer immédiatement l'approximation obtenue dans les mesures avec le dispositif de la figure 30. L'ampèremètre A indique rigoureusement l'intensité I dans la lampe, mais le voltmètre indique une tension *trop grande* de la quantité : $I\left(\frac{AS}{A+S}\right)$, puisqu'elle est réellement IR aux bornes de la lampe ; l'erreur absolue (positive) commise dans la lecture de E est donc : $I\left(\frac{AS}{A+S}\right)$ et l'erreur absolue sur la résistance : $\frac{AS}{A+S}$; l'*erreur relative* commise sur l'évaluation de la puissance vraie : I^2R (dans la lampe), aussi bien que sur l'évaluation de la résistance vraie R (de la lampe) est donc l'erreur relative commise sur le facteur R seul ; soit : $\frac{AS}{A+S} : R = \frac{r}{R}$; $\left(\text{en posant } r = \frac{AS}{A+S}\right)$.

Si l'on disposait les appareils comme le montre la figure 31, le voltmètre étant, cette fois, aux bornes de la lampe, indiquera la *tension exacte* E_1 aux bornes de la lampe, mais l'ampèremètre fournira une *intensité trop grande* de la quantité qui passe dans le voltmètre de résistance r', et qui est : $\frac{E_1}{r'}$; dans l'évaluation de la *puissance vraie* qui

vaut $E_1 I_1$ $\left(I_1 = \text{intensité vraie du courant dans la lampe} = \frac{E_1}{R}\right)$, et dans celle de la résistance vraie de la lampe $\left(\frac{E_1}{I_1}\right)$, on commettra la même erreur relative que sur I_1, seul facteur approché; l'erreur relative sur ce facteur sera donc : $\frac{E_1}{r'} : \frac{E_1}{R} = \frac{R}{r'}$. Or, la résistance d'un ampèremètre avec son shunt : r est négligeable devant celle : r' d'un voltmètre (r est toujours voisin de 0 ohm 05 ; r', selon les appareils, varie de 10.000 à 50.000 ohms); de plus la résistance d'une lampe (laquelle dépend du type choisi et de sa puissance lumineuse) n'est jamais inférieure à 100 ohms (régime normal); le dispositif de la figure 30 nous donnera donc une approximation de l'ordre


de : $\frac{r}{R} = \frac{0{,}05}{100}$ ou $\frac{5}{10^4}$; la fig. 31 nous en

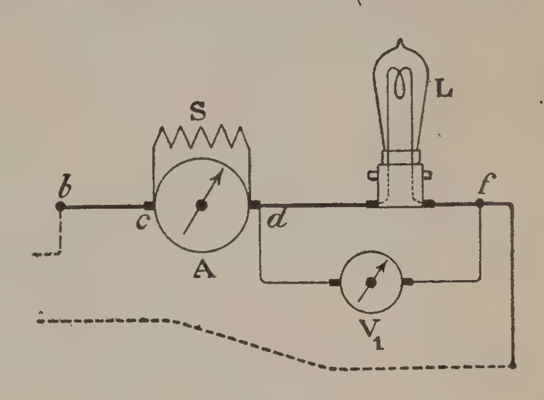


Fig. 31.

fournira une de l'ordre de ; $\frac{R}{r'} = \frac{100}{10.000}$ (valeur la plus grande) ou : $\frac{100}{50.000} = \frac{2}{10^3}$ (valeur la plus faible, *donc la plus avantageuse*); et l'on voit ainsi que le premier dispositif *doit être choisi*; ce qui a toujours lieu dans tous les *essais* de *lampes* à *incandescence*; le deuxième est réservé à l'emploi d'une lampe à arc, (voy. § 132) dont la *résistance* est *très faible* vis-à-vis de celle du *voltmètre*.

54. 2° *Exemples de mesure et carastéristiques.*— Nous opérons avec un type de lampe au tungstène en atmosphère gazeuse (lampe *Faust*, de la Cie Lorraine de lampes) marquée : 32 *b* — 115*v*. L'ampèremètre est du type Meylan-d'Arsonval à 100 divisions avec shunt 1, donnant le $\frac{1}{100}$ d'ampère (et sur lequel on peut apprécier 0a0025) ; le voltmètre, de même type, donnant des lectures à 1/4 volt près. Le tableau suivant reproduit les nombres obtenus:

E (volts)	5v,5	21v	33v,5	57	74	87	97	105,5	110	113	*115*
I (amp.)	0,095	0,135	0,160	0,200	0,220	0,240	0,2533	0,2600	0,2700	0,2760	*0,2800*
R (ohms)	»	155,55	»	285	»	362,5	»	405,77	»	»	*410,7*
P (watts)	»	2,83	»	11,4	»	20,88	»	27,43	»	»	*32,20*

Cette lampe commence à rougir à 13 volts.

La fig. 32 montre la caractéristique graphique de cette lampe (courbe A); il est *inutile* de calculer R et P avant l'obtention de la tension normale E = 115 volts ; nous avons donné cependant quelques valeurs intermé-

diaires, afin de vérifier l'accroissement de la résistance R avec E (donc avec la température) ; ainsi que celui de la puissance P.

Nous avons opéré sur d'autres lampes du même type, ou de types différents ; et les courbes de la fig. 32 sont relatives à des lampes Faust (dans le *vide* B ; 32 *b* — 110 *v*) ; et en *atmosphère gazeuse* A' : 50 *b* — 118 *v* ; et A'' 125 *b* — 119 *v*), ainsi qu'à 2 *lampes Mazda* (de la Cie des Lampes-métal), toutes deux en atmosphère gazeuse, l'une D' de 50 *b* — 112ᵛ, l'autre D'' de 125 *b* — 115ᵛ ; il serait fastidieux de donner les nombres obtenus pour tous ces types, le graphique permettant de les repérer facilement ; enfin, nous

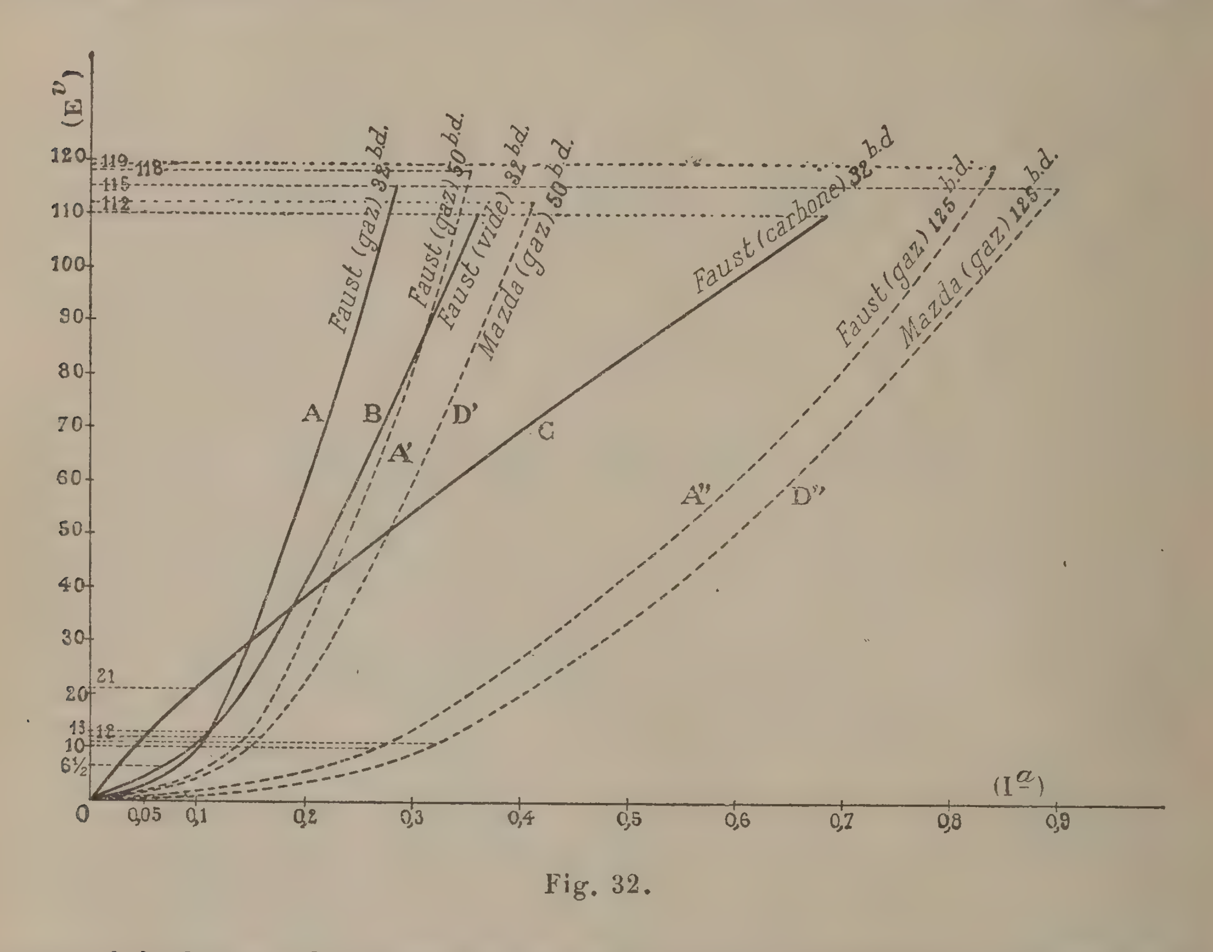


Fig. 32.

avons fait figurer la caractéristique d'une lampe Faust à filament de carbone graphité par le *procédé Planchon* : C, de 32*b* — 110ᵛ.

La fig. 33 montre les caractéristiques fournies par 3 lampes Philips (société Philips, d'Eindhoven, Hollande ; succursale à Saint-Cloud, France), et que nous avons déterminées de la même manière ; ces lampes sont à *atmosphère gazeuse*.

55. 3° *Usage des caractéristiques*. De l'examen des fig. 32 et 33, on peut tirer les conclusion suivantes :

α) le *coefficient angulaire*, en un point de chaque courbe, représentant la *résistance* du filament en ce point, l'on voit que la résistance du filament de carbone *diminue* (courbe C), quand I croît, donc quand la température croît (revoy. formule 11, § 23) ; tandis que celle des filaments de tungstène croît avec I, donc avec la température ;

β) le coefficient angulaire pour la courbe d'un filament de lampe *à gaz*, est toujours supérieur à celui que donne à tension égale la courbe d'un filament *dans le vide*, toutes choses égales (même intensité lumineuse, même tension normale ou à peu près : cas des courbes A, B); nous avons expliqué, précédemment, les raisons de ce fait : ceci revient à dire que la *température* des lampes à gaz est supérieure à celle des lampes à vide.

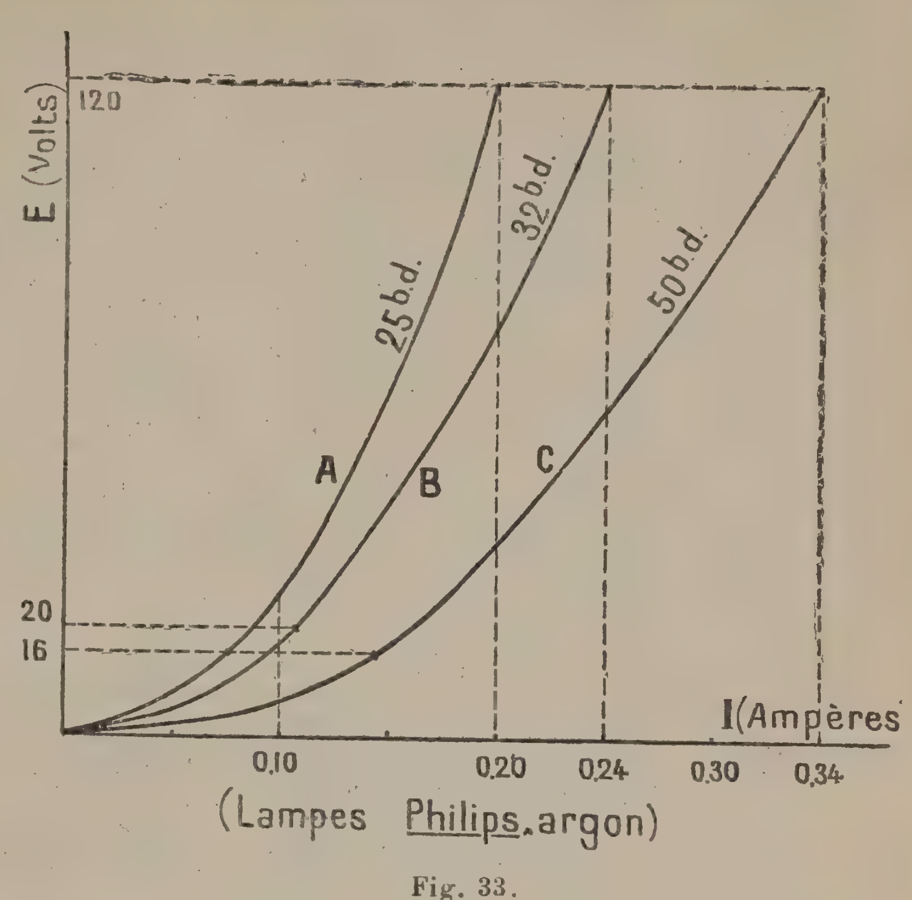


Fig. 33.

γ) Pour des lampes de *même type*, faites avec un filament de *même nature*, le coefficient angulaire, pour une tension donnée, est d'autant *plus grand* que l'intensité lumineuse est *plus faible* (les filaments sont *plus minces*) ; cas des courbes : A, A′, A″; ou D′, D″, de la figure 32; et des courbes A, B, C, de la figure 33.

δ enfin la *non-superposition* des courbes, pour des filaments de même nature, (tungstène dans l'argon ou dans l'azote), et pour des lampes de *même intensité lumineuse* (exemples : Faust et Mazda, 50 *b*; Faust et Madza, 125 *b*), indique que le filament employé d'un fabricant à l'autre *n'est pas rigoureusement le même* comme dimensions ; nous avons vu que, dans des *conditions déterminées* (§ 37), le rapport $\frac{R_n}{R_o}$ caractérise la *nature* du *métal*; ici, les *lampes Mazda*, à tension égale, présentant un filament *moins résistant* (pour une même intensité lumineuse), c'est que ce filament est un peu *plus gros* ou un peu moins *long* que celui de la lampe Faust. Pour savoir si le métal est *aussi pur*, il faut encore connaître la résistance à 0°, et par suite le rapport $\frac{R_n}{R_o}$ (Voy. plus loin).

N. B. — On conçoit, d'après ce qui précède, l'intérêt évident que présente le relevé des caractéristiques pour la connaissance exacte d'un filament de lampe.

56. *b*) **Résistance et puissance normales.** — La résistance normale R_n du filament Faust 32^b (gaz) que nous venons d'essayer, s'obtient aisément par le quotient $\frac{E\ norm.}{I\ norm.}$; or, E étant obtenue à $^1/_4$ de volt près, et I à $0^a,0025$ près, les erreurs relatives possibles pour l'évaluation de E_n et I_n sont respectivement $\frac{0,25}{115}$; et $\frac{0,0025}{0,2800}$; l'erreur relative du quotient $\frac{E_n}{I_n}$ sera donc : $\frac{0,25}{115} + \frac{0.0025}{0,2800} = \frac{1,11}{100}$; en général, on ne pourra compter que sur 2 *chiffres exacts*, *au plus*, nous prendrons : $R_n = 410$.

Mais pour les types de lampes plus puissants, l'intensité I étant plus grande, l'erreur relative sur I diminue ; à partir des lampes-gaz de 100^b, elle ne dépasse pas 3 $^0/_{00}$; et l'erreur relative totale : 5$^0/_{00}$.

Quant à la puissance normale P_n, qui est le produit ($E_n \times I_n$), son approximation est du *même ordre* (avec les mêmes facteurs); dans le cas qui nous occupe, $P_n = 32^w 2$, n'est connu exactement qu'avec la partie entière ; il en est de même jusqu'à la puissance lumineuse de 100 bougies ; *au-delà*, on peut compter sur *1 chiffre décimal exact*, au moins.

57. (*c*) *Résistance de la lampe à 0°.* — On mesure d'abord la résistance de la lampe, — qui est *très sensiblement* celle du filament, la résistance des électrodes étant négligeable (de l'ordre de 3 $^0/_{00}$ environ) devant celle-là, — à la température ordinaire, et au *pont de Wheatstone* (Voy. Traité d'Electricité, Tome I ; H. Pécheux. Delagrave, Editeurs). On emploie le Pont à corde (fig. 34), à fil aussi bien calibré que possible, le curseur F demeurant constamment *au milieu du fil*, de façon à éliminer les causes d'erreur dues à un inégal calibrage ; la lampe est reliée (en x) par 2 cordons de cuivre (résistance négligeable), aux bornes convenables B, C ; une boîte d'ohms (de 1 à 10.000 ohms) avec subdivisions de $\frac{1}{0}$, $\frac{2}{10}$ et $\frac{5}{10}$ d'ohm et à fiches est disposée en R, symétriquement à la lampe par rapport au milieu du fil N M ; on *règle la boîte* de façon à maintenir le *galvanomètre* G (à miroir et règle) au 0, lorsque le courant d'une pile Leclanché P est *lancé* dans le pont, ou lorsqu'il est interrompu. On démontre que, dans ce cas, l'*équilibre* existe entre les résistances, ce qui conduit à écrire que la résistance de la lampe est égale à celle que la boîte a mise dans le circuit ; ceci à la température de l'essai, relevée par un thermomètre à fronde voisin. Sur la fig. 34, on

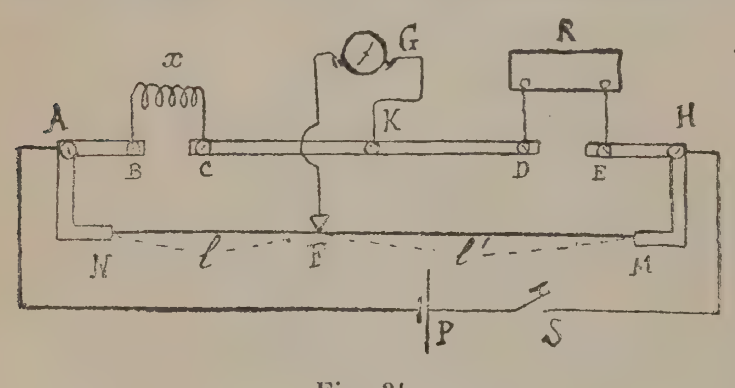


Fig. 34.

a: x (résistance de la lampe) $= R$ (si : $l = l'$; l et l' étant les 2 moitiés du fil N M, dont les résistances sont alors égales).

Pour la *lampe Faust* à gaz ($32^b - 115^v$) qui nous occupe présentement, nous trouvons : R_{15} (à 15°) $= 28$ ohs 6, à 3 $^0/_{00}$ près, d'après ce qui a été dit précédemment ; nous prendrons donc : $R_{15} = 28$ ohs 6. Nous admettrons, avec une *approximation suffisante*, qu'il s'agisse de tungstène pur (les *résultats ultérieurs* confirmeront ou infirmeront cette hypothèse, et l'on verra s'il y a lieu de reprendre les calculs), c'est-à-dire que nous adopterons, comme coefficient de température, $a = 0{,}0054$; dès lors, la résistance à 0° centigrade du filament de la lampe vaudra :

$$R_0 \quad \frac{R_{15}}{1 + 0{,}0054 \times 15} = \frac{28{,}6}{1{,}081} = 26 \text{ ohs } 46;$$

nous ne prendrons qu'un chiffre décimal.

58. *d*) *Rapport des résistances* : $\frac{R_n}{R_0}$. Comme $R_n = 410$ ohs, il viendra : $\frac{R_n}{R_0} = \frac{410}{26{,}4} = 15{,}53$; nous prendrons *15,5*, nombre correspondant bien au tungstène pur (revoy. § 37).

Pour les autres *types de lampes* essayés, et dont nous avons donné les caractéristiques, nous avons trouvé, par cette méthode, les valeurs suivantes pour le quotient caractéristique : $\frac{R_n}{R_0}$:

Lampes Faust (gaz)
- $32^b - 115^v$: 15,5;
- $50^b - 118^v$: 15,9;
- $125^b - 119^v$: 15,7;

Lampes Mazda (gaz)
- $50^b - 112^v$: 15,05;
- $125^b - 115^v$: 15,7.

Ces chiffres concordent suffisamment, sauf pour la lampe Mazda (50^b) qui semble indiquer un métal à *traces de fer* (voy. § 37)

Lampe Faust (vide) : 32^b-110^v : 12,62 ; Lampe Faust (carbone) 32^b-110^v : 0,51 ; la 1re fournit bien le chiffre que l'on doit avoir à la température *plus basse* du tungstène dans le vide (voy. § 37) ; le 2e correspond bien au nombre donné au § 26 (filament de carbone bien graphité.) Les lampes Philips, de 25^b, 32^b et 50^b donnent respectivement pour $\frac{R_n}{R_0}$: 15,4 ; 15 ; et 15, 9, qui se rapprochent de ceux de la lampe Faust (lampe à gaz inerte).

N. B. — Nous donnerons plus loin, pour les divers types de lampes que nous avons étudiés en dehors des précédents, la valeur du quotient $\frac{R_n}{R_m}$, avec leurs autres caractéristiques.

II. — Constantes calorifiques

Nous allons montrer comment on détermine la température du *filament à l'incandescence*, et son *rendement lumineux*, c'est-à-dire la proportion de radiations lumineuses correspondant à l'énergie calorifique totale absorbée.

59. 1° **Température d'un filament.** — On l'obtient par la méthode du *pyromètre optique* d'*Holborn* et *Kurlbaum*, et celle du *pyromètre optique* de *H. Le Châtelier*.

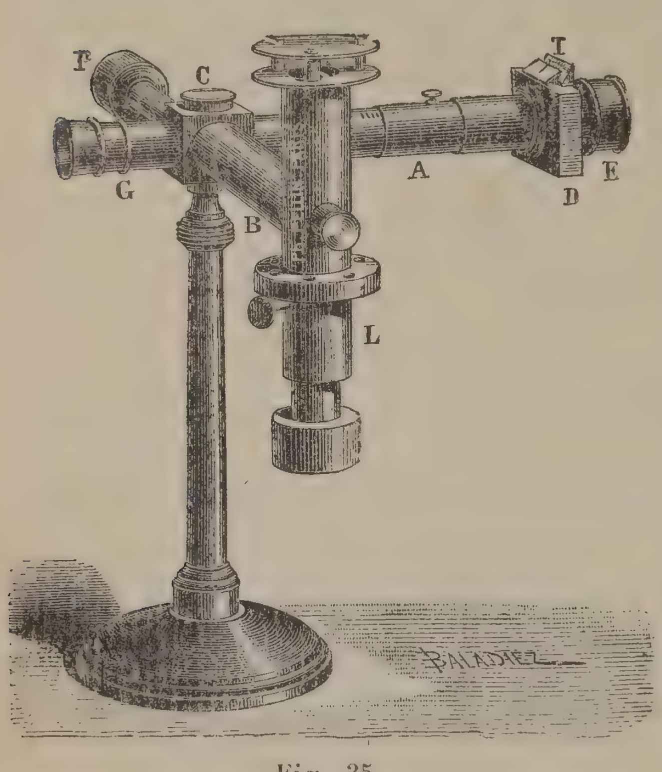


Fig. 35.

a) Méthode du pyromètre de *H. Le Châtelier*. — Cette méthode fournit les températures de 600° (rouge sombre) à 2000° (au delà du blanc-vif) ; elle permet donc de repérer la température normale d'un filament de lampe au carbone. L'appareil utilisé (fig. 35 et 36) mesure l'intensité des *radiations rouges* des corps incandescents : ces radiations, qui se développent les premières dans les filaments portés à l'incandescence, permettent de faire des mesures sur une échelle plus étendue. L'appareil se compose d'une lunette GA (1) (fig. 35) pourvue, dans une tubulure latérale B, d'une *lampe de comparaison* L bien réglée (à flamme d'essence de pétrole, dont la hauteur est réglée par la fenêtre du diaphragme placé devant); l'image de cette lampe se réfléchit sur un miroir M à 45° (fig. 36) disposé au foyer principal de la lunette GA ; on vise le filament incandescent avec l'objectif O, et on règle l'*égalité* d'*intensités* en agissant sur la flamme d'essence de pétrole : les

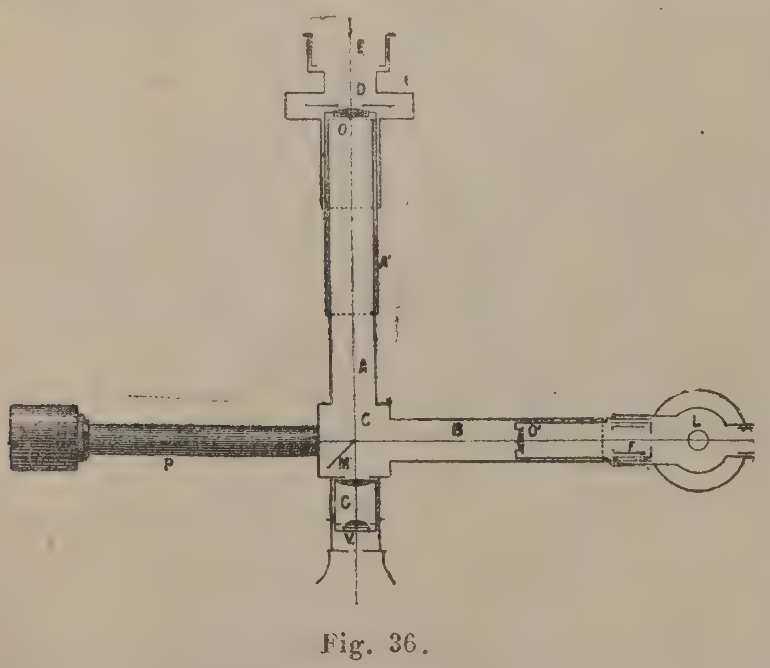


Fig. 36.

(1) Un *verre rouge* (monochromatique) est placé devant l'oculaire G.

images juxtaposées de la flamme et du filament sont alors *également éclairées*; la lentille O′ (fig. 36) concentre les rayons de la flamme sur le miroir qui coupe son image en deux, par son arête ; le miroir M est réglé par le bouton C (fig. 35.)

Quand les 2 images sont *au contact*, on tourne le bouton de l'œil-de-chat D (placé devant l'objectif O), pour obtenir l'égalité d'intensité de ces images.

On note le nombre de divisions: n (lues sur l'échelle T, indiquant l'ouverture de l'œil-de-chat, fig. 35) ; puis on vise une *lumière-étalon* disposée devant l'objectif O, à la place même de la lampe à filament de carbone, sans toucher à la lampe de comparaison L, et pour obtenir encore l'égalité d'intensités; on lit alors n' sur la règle T, qui correspond à l'ouverture de l'œil-de-chat. L'intensité du filament vaudra :

$$I = \left(\frac{n'}{n}\right)^2$$

On a dressé un *tableau* fournissant les températures correspondant aux diverses valeurs de I ainsi évaluées, et obtenu avec le *filament-type* de lampe-étalonnée dont les températures avaient été repérées à l'avance (par une méthode de *pyromètre thermo-électrique* par exemple, ou une autre méthode) :

I	Températures	I	Températures	I	Températures	I	Températures
0,000.08	600°	0,07.800	1.000°	3,35	1.400°	39,00	1.800°
0,000.75	700°	0,24	1.100°	6,70	1.500°	60,00	1.900°
0,004.60	800°	0,64	1.200°	12,90	1.600°	93,00	2.000°
0,020.00	900°	1,63	1.300°	22,40	1.700°	»	»

N. B.— La température normale d'une lampe à filament de carbone est voisine de 1700° (I = 22,4); pour un filament graphité, on obtient généralement, I = 50 ; ce qui avec *un calcul d'interpolation*, fournit la température correspondant à :

$$\frac{x - 1.800}{1.900 - 1.800} = \frac{50 - 39}{60 - 39}; \text{ ou } x - 1.800 = \frac{100 \times 11}{21} = 52^\circ 4; \text{ et } x = 1.852^\circ 4.$$

60. *b*) *Méthode du pyromètre* d'*Holborn* et *Kurlbaum*. — Elle s'applique jusqu'à 3000° et plus, elle peut donc fournir la température d'un filament le tungstène (dans le vide, ou dans un gaz inerte), d'un filament Nernst, et même celle de l'arc électrique.

L'appareil d'Holborn et Kurlbaum rappelle celui de Le Châtelier ; la lumière de comparaison est celle d'un filament L de lampe à incandescence au carbone, fonctionnant sous 6 volts, — à courant d'alimentation fourni par une pile sèche, et pourvu d'un rhéostat de réglage et d'un *milliampèremètre* sur le circuit du filament, pour évaluer les intensités du courant.

Ce filament de comparaison L est disposé comme *réticule* d'une lunette dont on tourne l'objectif vers la lampe à essayer à une distance *que l'on repère*. Au plan focal de la lunette, se forment 2 images: celle du filament rectiligne L de la lampe de comparaison, et celle du filament x de la lampe examinée, maintenue *à tension constante*.

Devant l'oculaire de la lunette on dispose un *verre rouge*; et l'on règle, à l'aide du rhéostat, l'*intensité du courant* dans le filament L, — par suite sa température, d'après la formule (11), — jusqu'à ce que les 2 images juxtaposées *se fondent* l'une dans l'autre: elles sont donc *à la même température* pour les *radiations rouges*; si l'on connaît la température du filament L, on aura donc celle du filament x.

L'on a dressé, au préalable, une *courbe* donnant la température du filament L en fonction de l'intensité du courant; cette courbe est relevée à l'aide du *corps noir de Lummer* (rev. § 9); — nous savons que le corps noir est celui qui a le plus grand pouvoir émissif, à une température donnée, et son pouvoir émissif est le même dans toutes les directions —; on dispose l'objectif de la lunette à une *distance bien repérée* de l'orifice d'émission du corps noir (même distance que celle à laquelle sont placés tous les filaments à essayer), et l'on règle le *courant du* filament de comparaison L pour obtenir l'*égalité* d'*intensités lumineuses*. Or, la température du cylindre de platine du corps noir (chauffé *électriquement*, et *graduellement* à l'aide d'un rhéostat) étant donnée, *à chaque instant*, par un pyromètre thermo-électrique, on aura les 2 éléments de la courbe en question. En abscisses, on portera les intensités relevées dans le filament L; en ordonnées, les températures correspondantes données par le corps noir. Donc, en lisant sur cette courbe, dans l'essai qui nous occupe, l'intensité du courant dans le filament L qui nous a donné le même éclat pour ce filament et le filament essayé, nous obtiendrons la température de ce dernier, — pour les *radiations rouges*.

N. B.— Le *verre rouge* s'emploie à partir de l'apparition de l'incandescence (600°); jusqu'à 1500° ou 1600° (température du filament de carbone), on opère très facilement, les éclats étant *comparables*; donc la méthode, telle que nous venons de l'exposer ne s'applique qu'aux lampes-carbone.

Mais quand on essaie une *lampe au tungstène*, ou une *lampe Nernst* il faut *affaiblir* les radiations tombant sur l'objectif, afin de permettre la comparaison. On emploie alors, dès 1500°, un *verre fumé*, dont on connaît le *coefficient d'affaiblissement* φ pour les radiations rouges que l'on observe à l'oculaire. Si T_0 est la température (absolue) ainsi *affaiblie*, obtenue pour un filament examiné dans un essai, T étant sa température (absolue) réelle; λ, la longueur d'ondes (en *microns*) des radiations rouges, c un coefficient dépendant du verre employé, on a la relation empirique suivante:

(23) $\log \varphi = \frac{c}{\lambda}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)$; l'essai donnant ainsi T_0, on en déduira T par le calcul.

Or, pour un verre fumé rouge, on a : $\varphi = 12{,}5$; $c = 14.500$; et $\lambda = 0\mu{,}643$; d'où :

$$\log 12{,}5 = \frac{14.500}{0{,}643}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right);$$ ou en effectuant :

$$1{,}09.691 = 22.550\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right);$$ d'où l'on déduit :

(24) $$T = \frac{T_0}{1 - 0{,}0000486T_0}.$$

Exemple. — Avec un filament de tungstène *dans le vide*, — sous *tension normale*, — nous avons obtenu, à l'aide de la courbe du filament de comparaison une température (affaiblie) égale à : 1.934° (centigrades) ; d'où : T_0 (absolue) = 1.934 + 273 = 2.207 ; on en déduit (formule 24) : $T = \frac{2.207}{0{,}89274} = 2.472$; d'où pour la température réelle (en degrés centigrades) : 2.472 — 273 = 2.199°.

On obtient, de la même façon, la température normale (2600°) d'un filament dans l'argon ou l'azote ; celle (2300°) d'une lampe Nernst intensive (celle du § 49).

De 2200° à 3000°, il est nécessaire de *faire réfléchir* 2 fois les radiations (sur un miroir dont on connaît le pouvoir réflecteur), afin de les affaiblir encore, pour permettre la comparaison au pyromètre.

N. B.— Nous décrirons plus loin (Chap. IV) le pyromètre optique de M. A. Blondel, pour l'évaluation de la température des surfaces incandescentes.

61. 2° **Rendement lumineux.** — Nous entendons par là le rapport de la *quantité de chaleur lumineuse* émise par une lampe, à la *quantité totale de chaleur* qu'elle absorbe, du fait du passage du courant. On le détermine de la manière suivante :

On entoure l'ampoule d'une feuille de papier d'étain (opaque à la chaleur lumineuse) et on l'immerge dans l'eau d'un calorimètre à eau en laiton. On fait passer, dans la lampe de résistance R (ohms), le courant d'alimentation I (ampères) sous la tension normale pendant t^{sec} ; le filament dégage m petites calories, définies par la formule de Joule :

(α) $m = \frac{RI^2t}{4{,}18}$; la mesure *faite au calorimètre* donnera cette quantité m, qui représente l'énergie totale émise (radiations lumineuses et radiations obscures).

On tient compte, évidemment, dans un tel calcul, de la *chaleur absorbée* (et aisée à évaluer) par l'enveloppe du calorimètre, le thermomètre, et le papier d'étain qui entoure l'ampoule (ceci, en fonction de leurs

masses, et de leurs chaleurs spécifiques); et l'*on ajoute* les calories ainsi *perdues*, à celles que donne l'équation habituelle du calorimètre à eau : l'on doit retrouver le nombre m défini par l'équation (α). Pour obtenir la quantité (m_1) de chaleur obscure correspondante, on répète l'expérience, *pendant le même temps*, dans un calorimètre en verre à solution *verte* de sulfate double de fer (*ferreux*) et d'ammonium, laquelle absorbe bien les radiations obscures, l'ampoule étant *nue*; l'on connaît la chaleur spécifique de cette solution (déterminée *a priori*); les radiations de chaleur lumineuse sortent seules du calorimètre, dont on connaît le pouvoir diathermane; on calcule ainsi (m_1) assez aisément; la chaleur lumineuse est donc représentée par ($m—m_1$).

Le rendement lumineux est alors :

$$\gamma = \frac{m - m_1}{m}. \tag{25}$$

On trouve, pour ce rendement : 0,6 % seulement pour le filament de carbone ordinaire (d'après Russner), — le température du filament est telle qu'il y a faible production de radiations sélectives — ; avec un *filament graphité*, on arrive à 0,8 %.

Avec le filament de *tungstène* (vide), on obtient : $\gamma = 2{,}46$ % ; avec le filament dans un gaz inerte : $\gamma = 3$ %. Avec le filament d'oxydes rares (*lampe Nernst*), malgré la température obtenue (2300°), le rendement est plus faible : 1,5 % ; il y a, à cause de la grande résistance du filament, *même à chaud*, une dépense plus grande de calories pour produire le *même éclat*; mais la *proportion* de radiations visibles est néanmoins plus grande qu'avec les premiers filaments (au tungstène).

N. B.— Nous indiquerons, au § 73, une méthode *beaucoup plus précise* pour obtenir le *rendement*.

III. — Constantes lumineuses

62. Ce sont les plus importantes qu'il y ait à considérer, — étant donné que les lampes à incandescence sont destinées à l'*éclairage électrique*.

Nous allons définir les *constantes lumineuses* d'une lampe à incandescence : intensité lumineuse horizontale, intensité sous divers angles, intensité moyenne sphérique; mais nous aurons besoin, pour bien établir la notion d'intensité moyenne sphérique, d'étudier également le *flux lumineux* émis par une lampe, — et la *distribution de la lumière* autour du filament.

Pour toutes ces grandeurs caractéristiques, il est nécessaire de faire appel aux *notions générales suivantes* : intensité de la lumière, — éclat, — éclairement,— flux lumineux; — facultés visuelles de l'œil; — coefficients de luminosité; — nous allons les établir, et nous exposerons ensuite les *méthodes photométriques* utilisées pour la détermination des

intensités et des *flux*, et celles qui fournissent l'*éclairement* des lampes à incandescence.

1° **Unités lumineuses** (d'*intensité* ; *d'éclat* ; de *flux*; d'*éclairement*)

Elles ont été fixées par le décret du 26 juillet 1919, et pour la *lumière blanche*. Nous admettrons donc, dans tout ce qui va suivre, qu'il s'agit de *lumière blanche exclusivement*.

63. **Définitions préliminaires**. — On dit que deux sources de lumière, — deux flammes, ou deux filaments incandescents de lampes électriques par exemple, de mêmes dimensions, et disposées semblablement par rapport à 2 écrans *de même nature*, un pour chaque source, — ont *même intensité*, quand les 2 écrans sont *éclairés également, à la même distance* des sources.

L'œil perçoit nettement l'égalité d'éclairement quand il est normalement conformé. L'*éclairement* n'est pas autre chose que la *quantité de lumière* reçue par l'*unité de surface* de l'écran.

Deux ou trois sources de lumière *identiques*, placées à la même distance d d'un écran, l'éclairent respectivement 2 ou 3 fois plus qu'une seule de ces sources; on dit aussi que le groupe de 2 ou 3 sources identiques a une intensité 2 ou 3 fois plus grande que chacune d'elles.

N. B. — Les définitions qui précèdent peuvent s'appliquer aussi bien à 2 lumières *monochromatiques*, qu'à 2 *lumières blanches*; nous examinerons d'abord, dans tout ce qui va suivre, le cas des sources de *lumière blanche exclusivement*.

64. **Lois et formules de l'éclairement**. — *a*) Soit une source lumineuse de dimensions négligeables (une source *ponctuelle*) ; enveloppons-là d'une sphère opaque de rayon d ; si Q est la *quantité totale* de lumière émise par cette source, — l'*éclairement* à la distance d, c'est-à-dire la quantité de lumière reçue par l'unité de surface de la sphère sera, par définition :

$$E = \frac{Q}{4\pi d^2}. \tag{26'}$$

Si nous appelons *intensité* lumineuse de la source, la *quantité* de lumière qu'elle envoie sur l'*unité de surface* à la *distance* 1, ce ne sera pas autre chose que l'éclairement, sur l'unité de surface d'une sphère de rayon 1, ou $\frac{Q}{4\pi}$, dû à la source en question; de sorte que si I est cette intensité lumineuse, nous pourrons écrire ainsi la formule (26') :

$E = \frac{Q}{4\pi} \times \frac{1}{d^2} = \frac{I}{d^2}$; soit :

$$E = \frac{I}{d^2}. \tag{26}$$

b) Soit maintenant un faisceau de lumière cylindrique (fig. 37), tombant normalement sur un écran AB ; on peut admettre que : la quantité de lumière reçue par l'unité de surface de AB (surface S) est partout la même, et égale à $\frac{Q}{S}$; ce sera l'éclairement sur AB, soit :

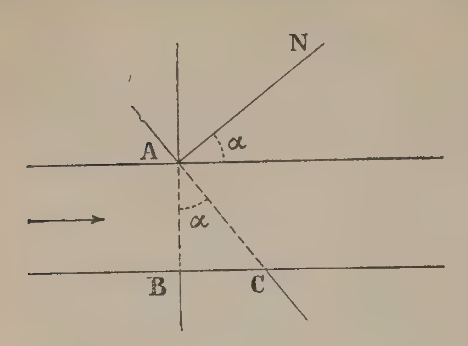


Fig. 37.

$$(27) \qquad E' = \frac{Q}{S}.$$

Sur une surface AC = S', oblique au faisceau lumineux, et inclinée d'un angle α sur la première (c'est l'angle de la normale AN à la surface AC, avec la direction du faisceau), l'éclairement vaudra : $E = \frac{Q}{S'}$; mais S = S'Cosα; d'où :

$$(27'') \qquad E = \frac{Q}{S}\mathrm{Cos}\alpha.$$

Si I est l'intensité de la source qui émet ce faisceau, à la distance *d* de AB, l'on pourra écrire, d'après la formule (26), en admettant que les dimensions de AB soient assez petites vis-à-vis de *d*, pour que AB puisse être considérée comme appartenant à une sphère de rayon *d* : $E' = \frac{I}{d^2}$; d'où :

$$(27) \qquad E = \frac{Q}{S}\mathrm{Cos}\alpha = E'\mathrm{Cos}\alpha = \frac{I\,\mathrm{Cos}\alpha}{d^2}$$: c'est la *formule générale de l'éclairement*, qui nous montre que : « l'éclairement d'une surface par une source d'intensité I est *directement proportionnel* à I, et au cosinus de l'angle des rayons incidents avec la normale à la surface éclairée ; et *inversement proportionnel* au carré de la distance de la surface à la source qui l'éclaire,

N. B. — Si une surface, éclairée par une source voisine, fait un angle *très faible* (donc α est voisin de 90°, par conséquent) avec la direction des rayons incidents dus à cette source, l'éclairement d'une telle surface sera *très faible*, même si elle est *rapprochée* de la source; — on le vérifie expérimentalement en inclinant plus ou moins une page d'écriture par rapport aux rayons d'une lampe, dans une *chambre noire* (afin qu'elle ne reçoive d'autre éclairement que celui dû à la source en question).

Si au contraire, la surface, tout en demeurant à la distance moyenne *d* de la source, se trouve disposée normalement aux rayons incidents, elle recevra l'éclairement maximum; car on aura : $\mathrm{Cos}\,\alpha = +1$; et, dans ce cas particulier où l'on se place dans les *mesures photométriques*, la formule de l'éclairement se ramène à la forme (26), que nous utiliserons par la suite.

65. **Unités lumineuses.** — *a*) L'unité d'intensité est l'intensité de la source qui produit l'unité d'éclairement ($E = 1$) à l'unité de distance ($d = 1$); c'est l'intensité de la *bougie décimale*, — 20e partie de l'intensité de l'*étalon Violle*, représentée par une surface incandescente de 1 cm² de platine fondu (dans un creuset de chaux vive) à la température de sa solidification (1775°), et estimée *normalement à cette surface*.

Les grands laboratoires (Laboratoire Central d'Electricité de Paris; Bureau of Standards de Washington ; National physical Laboratory de Londres) ; doivent conserver des *lampes-étalons* graduées en bougies décimales, et qu'ils peuvent fournir aux *laboratoires industriels*. On utilise aussi les *unités pratiques* suivantes, estimées *horizontalement* : la *bougie française de l'«Etoile»* (stéarine) à *flamme blanche* de 4 centimètres de longueur (non fuligineuse) vaut 1^{bd} 1/4 (*1 bougie décimale* 1/4); la *candle anglaise* (en spermaceti, brûlant 120 grammes à l'heure) vaut $0^{bd},98$; la *candle américaine* (analogue) vaut $1^{bd}02$; le *kerzen* (bougie allemande en paraffine) à flamme de 5 cm. de long vaut $1^{bd}221$; l'*heffner* (flamme d'acétate d'amyle, dans une lampe pourvue d'un régulateur qui fixe la hauteur de la flamme) vaut $0^{bd}895$. Enfin la flamme d'une *lampe Carcel* (brûlant 41 gr. 85 d'huile de colza épurée à l'heure) vaut $9^{bd}615$; et la flamme d'une lampe *Vernon-Harcourt* (au *pentane*, et brûlant à la pression de 76 cm de mercure), vaut : $9^{bd}8$.

On emploie comme *étalons d'intensité*, pour la comparaison des sources lumineuses électriques, des *lampes à incandescence* bien réglées, sous tension de courant constante (décret du 26 juillet 1919) (1); il y a ainsi des lampes de 5, 10, 16, 25, 32, 50, 100, 200 bougies décimales et plus.

b) L'unité d'*éclat* ou *brillance* est l'intensité lumineuse en bougies par centimètre carré de surface d'une *source lumineuse;* si I est l'intensité d'une source d'égal éclat et de surface *s* centimètres carrés, l'éclat sera:

$$e = \frac{I}{s}.$$

L'éclat d'une flamme de bougie de l'Etoile de 2 cm² 1/2 de surface, vaut ainsi : $e = \frac{1,25}{2,50} = 1/2$ bougie-centim. carré. Nous avons donné l'*éclat* du filament à incandescence de tungstène (dans le vide, et en atmosphère gazeuse). (La bougie-centimètre-carré reçoit encore le nom de *stilb*).

66. *c*) **L'unité de flux lumineux** est le flux (ou quantité de lumière émise par une source supposée *sans dimensions*, c'est-à-dire *ponctuelle*) dû à une source d'intensité égale à 1^{bd}, rayonné à travers une surface de 1 cm²

---

(1) La Commission internationale de l'Eclairage (1921) a adopté les définitions et unités qui suivent.

dans une sphère de rayon égal à 1 cm. ayant pour centre la source ponctuelle.

Il est facile de comprendre, — propriété géométrique connue, — que sur une sphère de 1 m. de rayon, concentrique à la précédente, la surface traversée par le flux conique lumineux qui découpe 1 cm^2 dans la sphère de 1 cm. de rayon vaudra : $1\ cm^2 \times \frac{100^2}{1^2} = 100^2$ centim. carrés $= 1\ m^2$. Donc, le flux qui traversera 1 m^2 de surface de sphère de 1 m. de rayon ayant la source ponctuelle de 1^{bd} en son centre, sera le même que celui qui traversera une surface de 1 cm^2 dans une sphère de rayon 1 cm.; on donne à cette *unité de flux*, le nom de *lumen*.

N. B. — On peut dire encore que le *lumen* est le flux dû à 1^{bd} dans un *angle solide* égal à l'unité, car l'angle solide qui intercepte le flux d'un lumen dans une sphère de rayon égal à 1 m., est égal à $\frac{1 m^2}{1^2} = 1$. (1)

Il en résulte, immédiatement, que le *flux total* qui traversera toute la surface d'une sphère de 1 cm. de rayon, — ou celui d'une sphère concentrique de 1 m. de rayon — vaudra : 4π *lumens*, avec une source de 1^{bd} au centre; ce sera aussi le flux qui traversera la *surface totale* d'une sphère concentrique aux précédentes et de *rayon quelconque* : R m.; en effet, le flux de 1 *lumen* traversera, sur cette dernière sphère, une surface de : R^2 m. carrés; donc la surface totale ($4\pi R^2$) de cette sphère recevra un flux total de 4π lumens; ou : 1 lumens $\times$ 4π *stéradians*.

Avec une source de I au centre, le flux total sphérique F vaudra $4\pi I$ lumens, dans une sphère de rayon quelconque; on pose : (28) $F = 4\pi I$.

On peut enfin généraliser, et dire que le *lumen* est le flux intercepté par une surface de 1 m^2 dont chaque point serait situé à 1 m. d'une source d'intensité égale à 1^{bd}.

Remarque. — Les 3 unités qui précèdent se rapportent spécialement aux *sources de lumière*; celle que nous allons définir caractérise les *surfaces éclairées*.

67. *d*) **L'unité d'éclairement est le lux**; c'est l'éclairement produit, sur une surface de 1 mètre carré, par un flux de 1 lumen également réparti sur cette surface perpendiculairement placée par rapport au flux.

N. B. — Un flux de 1 lumen, sur une surface de 1 cm^2 normale au flux, produira donc un éclairement 100^2 fois plus grand; il vaudra : 10^4 *lux*; on donne à cette unité (trop grande dans la pratique) le nom de *phot*.

On peut encore définir le *lux*, l'éclairement dû à une source de 1^{bd}, sur un plan qui en est distant de 1 m. au point où ce plan est normal aux

(1) L'unité d'angle solide est le *stéradian*, qui correspond à une surface de (R^2) m. carrés dans une sphère de rayon R m. La surface de la sphère correspond ainsi à : $\frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi$ stéradians.

rayons lumineux qui le rencontrent; on lui donne quelquefois, pour cette raison, le nom de *bougie-mètre*.

68. *e*) **Relation entre les unités lumineuses.** — 1° Soit une surface $AB = S$ cm² (figure 38), découpée dans une sphère de rayon R cm. ayant au centre une source de I bougies décimales. Découpons une surface $AC = 1$ cm² à l'aide du flux conique AIC. Le flux sur AC est le même que le flux sur A′C′ découpée dans la sphère concentrique de rayon égal à 1 cm. Si nous posons $A'C' = \sigma$ cm², le flux sur A′C′, — donc sur AC, — vaudra d'après le § 66 : $F = I\sigma$ lumens; mais $\sigma = \left(\frac{1}{R^2}\right)$ cent. carrés; d'où :

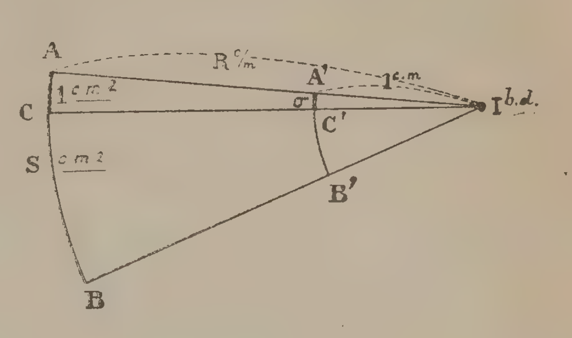


Fig. 38.

$$F = \frac{I}{R^2} \text{ lumens.} \tag{29}$$

L'*éclairement* sur la surface $AC = 1$ cm², de AB (uniformément traversée par le flux constant du cône AIB) vaut, d'après le N.B. du § 67 : $\left(\frac{I}{R^2}\right) \times 10^4$ *lux*.

Sur toute la surface AB le flux est le même qu'à travers la surface A′B′; soit :

$$F' = I \times A'B' = I \times \frac{AB}{R^2} = \frac{I}{R^2} \times S \text{ cm}^2. \tag{30}$$

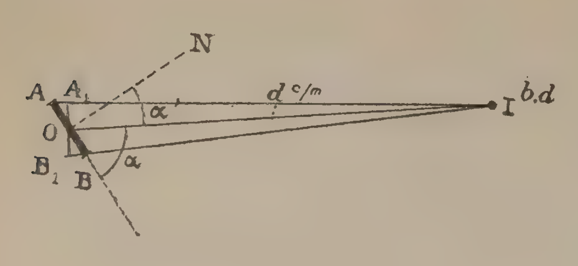
Or, on peut écrire *identiquement* : $F' = \left(\frac{I}{R^2} \times 10^4\right) \times (S \times 10^{-4})$; et $\frac{I}{R^2} \times 10^4$ est l'éclairement en *lux* de la surface AB qui vaut : (S cm² $\times 10^{-4}$) mètres carrés : donc F′ sera exprimé en *lumens*. Par suite, en langage ordinaire, on peut écrire :

(30′) Flux (en *lumens*) = Eclairement (en *lux*) × surface éclairée en *m. carrés*).

N. B.— Nous utiliserons cette relation, dans l'étude d'un *projet d'éclairage*, dont elle est la base fondamentale.

Ainsi, si l'on veut obtenir un éclairement uniforme de 2 lux sur une surface de 25 mètres carrés, il faudra utiliser un flux de : $2 \times 25 = 50$ lumens; nous verrons comment on choisit la lampe électrique répondant à la question (après l'étude de la détermination de l'intensité lumineuse des lampes).

2° Soit une surface AB (fig. 39), très petite par rapport à la distance d de son centre à la source de I qui l'éclaire ; dans ces conditions, l'on peut considérer la section (A_1B_1) découpée dans la sphère de rayon $d^{c}/_{m}$ par le flux lumineux AIB, comme étant la projection de AB sur cette sphère. Posons : AB = s cent. carrés. Le flux sur AB (le même que sur A_1B_1) vaudra, d'après le (§ 68. 1°) :



Fig, 39.

$F' = \left(\frac{I}{d^2} \times A_1B_1 \text{ cm}^2\right)$ lumens ; mais $A_1B_1 = AB \text{ Cos } \alpha'$ (α' = angle de la normale à la petite surface éclairée avec le rayon lumineux principal IO) ; soit (voy. figure) : $A_1B_1 = AB \text{ Sin } \alpha = s \text{ Sin } \alpha$; d'où :

$$(31) \qquad F' = \left(\frac{I}{d^2} \times s \text{ Sin } \alpha\right) \textit{lumens} = \left(\frac{I \text{ Sin } \alpha}{d^2}\right) \times s \text{ lumens.}$$

$\left(\frac{I}{d^2} \text{ Sin } \alpha\right)$ est l'éclairement, supposé uniforme, sur AB : en *lux* il vaut : $\frac{I \text{ Sin } \alpha}{d^2} \times 10^4$; la surface AB, en mètres carrés, vaut : $s \times 10^{-4}$; dès lors, **la formule** 30 *est généralisée.*

N. B. — **L'*angle solide* sous lequel AB est éclairée, vaut :** $\omega = \frac{\text{surf. } A_1B_1}{d^2} = \frac{s \sin \alpha}{d^2}$; **la formule (31) peut alors s'écrire : (31′)** $F' = (\omega \times I)$ ***lumens*** **; c'est-à-dire :**

Flux lumineux conique = *angle solide du cône* × *intensité lumineuse*
(*lumens*) (*stéradians*) (*bougies*)

La valeur de ω **ne dépend** *nullement des unités* **choisies pour** s **et** d, **pourvu qu'elles se correspondent (**s **en** cm^2 **et** d **en cm. ; ou** s **en** m^2 **et** d **en m.).**

Si maintenant e **est l'éclat (supposé uniforme, comme c'est le cas avec les filaments incandescents) d'une source dont la surface éclairante est** a cm^2, **on aura la formule définitive : (31″)** $F' = \omega \times e \times a$.

69. **Facultés visuelles ; rapport avec l'éclairement.** — Les facultés visuelles, — ou facultés de l'œil d'examiner nettement les détails des objets, — croissent avec l'*éclairement.* Les principales facultés visuelles sont l'*acuité*, la rapidité de *discernement*, la rapidité d'*accommodation*, et la *continuité* de la vision.

a) *Acuité visuelle.* — C'est la facilité plus ou moins grande avec laquelle l'œil peut distinguer nettement les détails d'un objet, quand il est suffisamment éclairé. — Telle personne qui distingue très nettement un objet bien éclairé de 5 $^{c}/_{m}$ de long, placé à une certaine distance, a une vue 2 fois plus aiguë qu'une autre personne qui ne distinguerait avec la *même netteté* qu'un objet de 10 $^{c}/_{m}$ (2 fois plus long) également éclairé, et à la même distance. L'acuité visuelle est donc *inversement proportionnelle*, pour un éclairement donné, à la *longueur* de l'objet examiné. L'expérience montre que l'*acuité visuelle* est *accrue*

par l'éclairement. Ainsi, lorsque l'éclairement d'un objet déterminé, à une distance déterminée, passe de 5 lux à 20 lux, l'accroissement d'acuité visuelle est de 50 % ; de 20 lux à 40 lux, cet accroissement est de 17 % sur le précédent : ceci, pour un *œil normal.* Pour un *œil défectueux*, il est *plus sensible* ; il passe, dans les mêmes limites d'accroissement d'éclairement à 63 % (1er cas) et 42 % (2e cas) ; au delà de 60 lux, les accroissements sont les *mêmes* pour les deux catégories d'yeux, mais beaucoup moins accentués.

b) *Rapidité de discernement.* — On entend par là la vitesse avec laquelle l'œil peut distinguer avec netteté les différences de détails caractérisant un objet éclairé. On la définit en évaluant le temps nécessaire à un œil pour voir nettement le *même objet* soumis à des éclairements croissants (par exemple à ceux d'une lampe, puis de 2 lampes, de 3 lampes, disposées successivement à la *même distance* de l'objet examiné).

L'expérience montre que, en passant d'un éclairement de 30 lux à celui de 40 lux, pour l'objet, la rapidité de discernement devient 1,11 fois plus grande ; en passant d'un éclairement de 40 lux à celui de 80 lux, elle devient 1,25 fois plus grande que la précédente ; et ainsi de suite : elle augmente avec l'éclairement.

c) *Rapidité d'accommodation.* — Un œil normal voit distinctement à 28 c/m (*distance minima de la vision distincte*) ; un myope voit nettement à une distance plus faible ; un presbyte, à une distance plus grande.

Mais l'œil, grâce aux muscles qu'il possède, jouit de la faculté de s'adapter à des visions de plus longues distances ; le myope n'y arrive pas sans le secours de lunettes ; le presbyte s'adapte à voir à des distances plus grandes que l'œil normal ; on donne, à cette adaptation de l'œil à voir à des distances différentes, le nom d'accommodation.

Pour un œil, quelle que soit sa puissance d'accommodation, la *rapidité* d'accommodation est accrue par un meilleur éclairement.

On définit la rapidité d'accommodation par le *temps* nécessaire à un observateur pour voir nettement 3 *objets différents* par exemple, disposés à des distances croissantes, et soumis à des éclairements croissants.

L'expérience montre que, pour un *œil normal*, si l'on observe d'abord un objet à 5 m. éclairé par 1 lampe, puis un 2e objet à 10 m. éclairé par 8 lampes identiques à la première (éclairement *double*) ; un 3e objet à 15 mètres, éclairé par 27 lampes (identiques, toujours, à la première, l'éclairement est alors *triple*), la rapidité d'accommodation croît de la valeur 1 à la valeur 1,4 (de 5m. à 10m.), puis de la valeur 1 à la valeur 1,8 (de 5m. à 15m.) ; autrement dit, *le temps* mis par l'œil est successivement 1,4 fois moindre pour voir à une distance double un objet 2 fois plus éclairé, et 1,8 fois moindre pour voir à une distance triple, un objet 3 fois plus éclairé : l'accroissement d'éclairement a donc pour effet un accroissement de la rapidité d'accommodation, pour un *œil normal.*

Pour un *œil défectueux,* la rapidité d'accommodation croît encore davantage avec l'accroissement d'éclairement : 1 fois 1/4 plus vite, en moyenne.

d) Continuité de vision. — C'est la faculté que possède un œil de voir nettement tous les détails d'un objet, à n'importe quel instant d'un examen d'assez longue durée. Quand on fixe un objet à distance déterminée, la vue *se trouble* au bout de quelques instants si l'objet est *mal éclairé*, ou s'il l'est trop ; admettons simplement le cas d'éclairements qui ne fatiguent pas la vue.

Supposons que l'œil observe, pendant 2 minutes, un objet éclairé à une distance donnée ; pendant une partie de ces 2 minutes, la vision reste *nette*, et elle *se trouble* dans le reste de cette durée totale de 2 minutes.

En recommençant l'expérience après avoir éclairé l'objet 2 fois plus on constate que le temps pendant lequel la vision demeure nette (sur une durée totale de 2 minutes, toujours) s'est *accru* ; avec un éclairement *triple*, le temps de la vision nette s'accroît encore davantage.

On peut ainsi définir la continuité de la vision par le rapport du temps de vision nette au temps de vision trouble, pendant une durée toujours égale à 2 minutes. Ainsi, en passant de l'éclairement de 20 lux, à celui de 40 lux, la continuité de vision s'accroît 2 fois plus que lorsqu'on passe de l'éclairement 0 à l'éclairement 20 lux ; de 40 à 60 lux, elle s'accroît 1,25 fois plus que de 20 à 40 lux, pour un *œil défectueux* ; pour un *œil normal*, l'accroissement est *le même*, seulement, de 0 à 20 lux que de 20 à 40 lux ; de 40 à 60 lux, il s'accroît de 1,2 fois plus.

N. B.— *En résumé,* il résulte de tout ce qui précède, que l'augmentation de l'éclairement des objets *améliore* les *facultés de l'œil,* — de l'œil normal, et surtout de l'œil défectueusement conformé par la nature.

70. 2° **Flux de lumière composée** (lumière *monochromatique* ; lumière *composée* ; coefficients de *luminosité ; courbes.*)

Les unités lumineuses établies précédemment sont relatives à la *lumière blanche* (celle du *soleil*, par exemple ; la lumière du filament Nernst s'en rapproche beaucoup ; celle du tungstène en atmosphère gazeuse, également). Mais il existe des sources lumineuses dont la lumière (*composée*) ne fournit pas un spectre identique à celui de la lumière blanche, c'est-à-dire un spectre où les diverses radiations monochromatiques y occupent la *même place*, ou y ont la *même proportion.* Comme il sera nécessaire, dans l'établissement de l'intensité lumineuse de sources de lumière composée, de les comparer à des sources-étalons de *lumière blanche,*— ou *considérée comme de la lumière blanche,*— il est nécessaire de définir ce que l'on entend par *coefficient* de *luminosité* d'une lumière composée, qui caractérisera en quelque sorte *la sensibilité de l'œil* pour la comparaison des diverses couleurs; nous définirons *le*

flux de lumière composée, et le *coefficient* de *luminosité*, et nous monrerons l'usage des *courbes* de *luminosité*.

Remarquons, tout d'abord, qu'au point de vue éclairage, les radiations utiles sont celles de la partie visible du spectre, — lesquelles ne prétentent pas, toutes, la *même efficacité* pour produire la sensation de lumière.

Le spectre visible s'étend généralement de la longueur d'onde : 0μ (violet) à la longueur d'onde $0 \mu 8$ (rouge); on peut cependant apercevoir les radiations de longueur d'onde égale à 1μ (au-delà du rouge), et celles dont la longueur d'onde vaut $0 \mu 37$ (raie du *mercure* au-delà du violet); mais l'œil n'est vraiment sensible que pour les radiations comprises entre $\lambda = 0 \mu 4$, et $\lambda = 0 \mu 8$.

a) **Flux lumineux composé.** — On peut constater expérimentalement, avec deux radiations *jaunes*, par exemple, que le flux envoyé sur une surface de 1 cm 2, par une source d'intensité égale à 4, est 4 fois plus grand que celui qui est envoyé, sur la même surface, à la *même distance*, par une source d'intensité 1 ; (c'est la formule 29 qui précède, appliquée à ce cas). Or, l'énergie rayonnée par seconde (c'est-à-dire la *puissance rayonnée*) par une source d'intensité 4, est 4 fois plus grande que la puissance rayonnée par une source d'intensité 1 ; il en résulte immédiatement, que le flux lumineux est proportionnel à la puissance rayonnée par seconde; si donc F_1 est le flux de lumière jaune par centimètre carré correspondant à une énergie rayonnée (par seconde) égale à w_1, l'on pourra écrire :

(32)' $F_1 = h_1 \times w_1$; h_1 porte le nom de *coefficient* de *luminosité* de la radiation jaune (de *longueur d'onde connue*); pour une autre radiation (rouge ou verte) il existera une *relation analogue*; mais le *coefficient* de *luminosité* sera *différent*; — or, dans une *radiation composée*, les flux lumineux monochromatiques s'ajoutent nécessairement (ils se composent) ; donc, le flux F d'une telle lumière composée sera la somme de flux tels que F_1, en même temps que l'énergie rayonnée W sera la somme d'énergies telles que w_1 ; on aura : $F = \Sigma F_1$; avec : $W = \Sigma w_1$; on pourra donc écrire : $F = \Sigma (h_1 w_1)$; ou encore :

(32) $F = HW$; (H est le coefficient de luminosité de la lumière composée).

Il est évident que ce facteur H dépend de la *composition* de la lumière essayée; il est *plus faible* si cette lumière ne comprend que des radiations des extrémités du spectre (*rouges par exemple* ou *violettes*), que si elle comprend des radiations considérées vers le milieu de ce spectre (*vertes* ou *jaunes*).

Quand 2 lumières sont de *même composition*, — sans être *réellement blanches*, — c'est-à-dire quand elles fournissent *le même spectre*, elles

donnent à l'*œil* la sensation de *couleurs identiques* ; et on peut les *comparer pratiquement*, tout comme 2 lumières *monochromatiques* (cas des radiations *jaunes* de tout à l'heure), ou encore comme *2 lumières blanches*.

Pour la lumière solaire, H prend une valeur particulière H_0 ; et l'on donne à l'inverse : $\frac{1}{H_0}$, le nom d'*équivalent mécanique* (en watts) de la lumière blanche (en *lumens*) ; nous donnerons sa valeur plus loin.

Les lumières *blanches usuelles* (flamme d'une bougie de l'Etoile ; flamme de la lampe Heffner, filament Nernst, filament du tungstène dans un gaz inerte), donnent des rayonnements *non identiques*, mais cependant *assez voisins* pour que l'œil ne perçoive pas de différence sensible ; nous les considérerons *pratiquement* comme ayant des rayonnements identiques, voisins de celui de la *lumière blanche réelle*.

71. *b*) **Coefficients de luminosité**; *courbe*. — On détermine les coefficients de luminosité tels que h_1, pour chaque radiation monochromatique, de la manière suivante : on évalue le flux F_1 (au *photomètre*, comme nous le verrons un peu plus loin) ; on mesure w_1 à l'aide de la *courbe de répartition* de l'énergie dans le *spectre* de la lumière composée qui nous intéresse (fig. 7 ; § 15 ; 2°), en mesurant l'ordonnée correspondant à la longueur d'onde de la radiation monochromatique en question.

On peut encore envoyer, sur la soudure d'un pyromètre thermo-électrique, les radiations en question, et déduire l'énergie de rayonnement p ar seconde) de la température absolue relevée (loi de Stéphan) ; d'où :
$h_1 = \frac{F_1}{w_1}$.

On dresse alors une *courbe* des *coefficients* de *luminosité*, en portant *en abscisses* les longueurs d'onde λ des diverses radiations en question, et en *ordonnées*, les valeurs de h_1 par rapport au *coefficient* de *luminosité maximum* h_0 (celui pour lequel on a trouvé la plus grande valeur), c'est-à-dire les rapports : $\frac{h_1}{h_0}$.

Il est clair de comprendre que les flux tels que F_1, étant évalués au *photomètre* par comparaison avec un *flux-étalon*, dépendent de la sensibilité de l'œil de l'opérateur à apprécier les *éclairements* qui servent à les déterminer (voyez *méthodes photométriques* (3° *Mesure de l'intensité lumineuse*) ; par suite, chaque œil aura *sa courbe propre* de luminosité. Il est nécessaire, pour l'exactitude des mesures photométriques, qu'il existe une *courbe de luminosité moyenne* correspondant à ce que l'on nomme un *œil moyen* (ce sera *la moyenne* des courbes obtenues par un grand nombre d'observateurs, ayant tous un *œil normal*, et dont les résultats des mesures seront *suffisamment rapprochés*). La

figure 40 représente cette courbe de luminosité moyenne, due à *Ives*, d'après les mesures de 18 observateurs.

A l'aide de cette courbe AMB, l'on remarque : que le coefficient de luminosité maximum en M correspond à $\lambda = 0\mu 55$ (entre le *jaune* et le *vert*), et que $\frac{h_1}{h_0}$ croît rapidement, à partir de $\lambda = 0\mu 50$ (*bleu*), en A, et décroît plus rapidement du *jaune-vert* ($\lambda = 0\mu 55$) en M, au *rouge* au-delà de B, à droite.

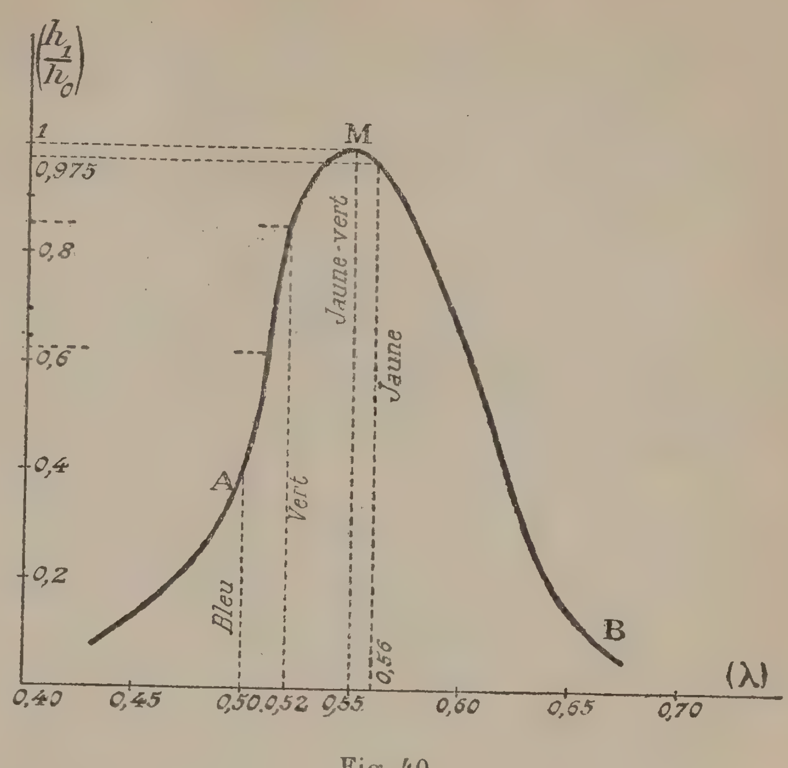


Fig. 40.

72. *c*) **Equivalent mécanique de la lumière.** — Il y a autant de valeurs de cet équivalent qu'il y a de valeurs de $\frac{1}{h_1}$ (radiations monochromatiques), ou de valeurs de $\frac{1}{H}$ (lumières composées).

1° On a déterminé expérimentalement, la valeur de $\frac{1}{H}$ pour les *lumières blanches usuelles* (on pose donc $H = H_0$; ce qui fait aussi que l'on détermine $\frac{1}{H_0}$) : on évalue F (flux lumineux) en *lumens* par cent. carré (voyez plus loin), pour la lumière employée ; et l'on mesure W en watts, en recevant l'énergie lumineuse rayonnée (par seconde) sur la soudure d'un pyromètre (comme nous l'avons dit précédemment), mais en *arrêtant* les radiations *non visibles*, — surtout celles de l'*infra-rouge*, qui rayonnent une quantité d'énergie assez grande, — l'ultra-violet ne rayonnant qu'une *puissance faible* ; on *arrête* les radiations infra-rouges en interposant, sur le trajet du flux lumineux, une cuve absorbante renfermant la solution suivante :

$$(33)\quad \left\{ \begin{array}{ll} CuCl^2 = 60 \text{ grammes} & \\ SO^4Co + SO^4(AzH^4)^2 = 14 \text{ gr. } 5 & \\ CrO^4K^2 & = \ \ 2 \text{ grammes} \\ AzO^3H(d = 1{,}05) & = 19 \text{ grammes} \\ \quad \text{Eau :} & \text{pour 1 litre de solution ;} \end{array} \right.$$

cette cuve doit avoir 1 cm. d'épaisseur; on lui juxtapose une deuxième cuve d'eau pure (de 2 cm. d'épaisseur) pour achever d'absorber les

radiations infra-rouges (calorifiques) que la première aurait pu laisser passer.

Les valeurs trouvées pour $\frac{1}{H_0}$ varient nécessairement avec la source blanche employée; avec la flamme Heffner, Angström a trouvé : $\frac{1}{H_0} = 0$ watt,009; Drysdale et Jolley, avec la lampe Nernst, ont obtenu $\frac{1}{H_0} = 0$ watt,0095, on a adopté $\frac{1}{H_0} = 0{,}01$. Pour la lumière blanche réelle (du soleil), on trouve un nombre beaucoup plus faible; on a :

F = 13 lumens 5 (par centim. carré, à la limite de l'atmosphère, laquelle *en absorbe* 3,25); et $W = \frac{1{,}5 \times 10^6}{3}$ ergs seconde (Wood) (1); soit en *watts* : $\frac{1{,}5 \times 10^{-1}}{3} = 0{,}05$; et $\frac{1}{H_0} = \frac{0{,}05}{13{,}50} = 0$ watt,0037.

2° Pour une lumière monochromatique, on a d'abord déterminé l'équivalent correspondant au coefficient de luminosité maximum : $\frac{1}{h_0}$, en posant identiquement : $\frac{1}{h_0} = \frac{1}{h'_1} \times \frac{h'_1}{h_0}$; h'_1 étant le coefficient de luminosité de la *raie verte* du mercure obtenue avec le spectre de l'*arc* au *mercure* (lampe à mercure, voy. plus loin) ($\lambda = 0\mu\,546$, d'après Buisson et Fabry); le flux étant mesuré au photomètre (photomètrie *hétérochrome*), et la puissance rayonnée évaluée à la pile thermo-électrique; Buisson et Fabry ont trouvé : $\frac{1}{h'_1} = 0{,}00143$; Ives et Kingsburg, avec des moyens plus précis, ont obtenu : $\frac{1}{h'_1} = 0{,}00163$; d'où l'équivalent pour la radiation de luminosité maxima :

$\frac{1}{h_0} = 0{,}00163 \times \frac{h'_1}{h_0}$; en mesurant $\frac{h'_1}{h_0}$ sur la courbe de la figure 40, on trouve : $\frac{h'_1}{h_0} = 0{,}975$; d'où, enfin, $\frac{1}{h_0} = 0$w.,00159; on prend 0 watt 0016.

N. B. — La connaissance de l'équivalent mécanique de la lumière permet d'évaluer avec précision les flux lumineux en *watts*, et d'obtenir ainsi, avec une *plus grande précision*, le *rendement lumineux* des lampes (que nous avons exposé antérieurement, au § 61, par une méthode *calorimétrique* pure, et qui fournit des nombres un *peu faibles*).

73. *d*) **Rendement lumineux des lampes.**— C'est le rapport de la *puissance équivalente* au flux lumineux émis par la source (c'est W), à la puissance totale qu'elle consomme (W'); ce rendement est : $r = \frac{W}{W'}$.

Nous venons de voir comment on obtient W, connaissant $\frac{1}{H_0}$ (lumière

(1) La puissance totale absorbée pour 1 *c. m²* et 1 *seconde* est : $1{,}5 \times 10^6$ (voy. § 11); le $\frac{1}{3}$ seulement représente le *spectre visible*.

blanche usuelle $= 0^w, 01$), et le flux F que l'on détermine *a priori* (nous verrons comment).

Quant à W′, elle s'obtient comme nous avons dit au § 61, ou *immédiatement* par la formule de Joule, — formule α du même paragraphe (ce qui dispense de l'emploi du calorimètre, rendu inutile dans la méthode actuelle).

On obtient ainsi, pour un filament de tungstène : $r = 3\%$; pour un filament au tungstène dans le vide : 3,6 %; pour le filament *Nernst* : 1,8 %.

3° Intensité lumineuse des lampes à incandescence

74. **Principes.** *a*) On obtient l'*intensité lumineuse* d'une lampe à incandescence, en la *comparant* à celle d'une lampe étalonnée au préalable, et de *même couleur* ; nous supposerons d'abord qu'il s'agisse de *lumières blanches usuelles.*

Pour faire cette mesure on compare, en *chambre noire,* les *éclairements* des 2 sources, la source à essayer, et la source étalonnée, à l'aide d'un *photomètre,* lequel se compose essentiellement d'un *écran,* de forme variable avec les types d'appareils, sur lequel on détermine *2 éclairements égaux,* celui de la lampe examinée et celui de l'étalon.

N. B. — Dans la mesure des intensités lumineuses, nous désignerons *dorénavant* cette grandeur par L (au lieu de I, afin d'éviter la confusion avec l'intensité I du courant d'alimentation), c'est-à-dire que nous substituerons L à I dans les formules 26 à 31 qui précèdent.

Soient donc L, L′ les intensités lumineuses *horizontales* de la lampe inconnue et de la lampe étalon, disposées respectivement aux distances d, et d' de l'écran du photomètre, et de façon que les rayons incidents qui éclairent l'écran, soient également inclinés sur cet écran ; l'éclairement dû à la 1re source vaut (form. 27) :

$E = \frac{L \cos \alpha}{d^2}$; celui dû à la source étalon : $E' = \frac{L' \cos \alpha}{d'^2}$; si l'égalité d'éclairement est obtenue, on aura :

$$\frac{L \cos \alpha}{d^2} = \frac{L' \cos \alpha}{d'^2}\text{; d'où :} \qquad (34) \qquad L = L' \times \left(\frac{d}{d'}\right)^2 :$$

telle est la *formule du photomètre,* qui fournira L en fonction de L′ par les seules mesures des distances d et d'.

Dans la pratique, on s'arrange pour que les surfaces éclairées sur l'écran soient *normales* aux rayons incidents qui les éclairent.

b) Quand il s'agit de lumières de *même couleur,* — ou à peu près, — comme celles dûes à 2 lampes de même nature (au carbone, ou au tungstène), il est facile de juger de l'égalité d'éclairement par l'*identité d'aspect* ; pour deux lampes de couleurs différentes (lampe au tungstène, et lampe au carbone), mais peu éloignées, on juge de l'égalité d'éclairement par l'*égalité d'éclat,* ce dont un œil exercé peut s'acquitter aisément, en faisant abstraction de l'inégalité de couleurs.

Si les lumières comparées sont de *tons différents* (lumière blanche et lumière rouge, lumière blanche et lumière verte), il faut encore juger de l'*égalité d'éclat*, mais en employant un dispositif spécial qui permet d'obtenir la *fusion* des éclats de couleurs différentes (cas de photométrie *hétérochrome*, que nous examinerons),

Nous allons décrire les *meilleurs photomètres* employés, et nous indiquerons, pour chacun, ses caractéristiques propres et son mode d'emploi ; puis nous donnerons les *méthodes photométriques* à suivre (emploi du photomètre, et de la source-étalon), pour la mesure d'intensités lumineuses de lampes de *lumière blanche usuelle*, et de lampes de *couleur*.

75. I. **Photomètres.** — Les meilleurs photomètres actuels sont ceux de *Bunsen-Burel* et de *Lummer* et *Brodhun* ; nous indiquerons aussi les *photomètres* pour mesure d'intensité de *lumière colorée* (dits *à scintillement*).

a) **Photomètre de Bunsen-Burel..** — Il se compose d'un écran en papier C (fig. 41, qui représente l'appareil en *projection horizontale*) tendu dans un châssis métallique disposé selon le plan bissecteur du dièdre formé par 2 miroirs plans M, M′ ; le tout est disposé verticalement sur une planchette K, fixée horizontalement sur une colonne métallique P.

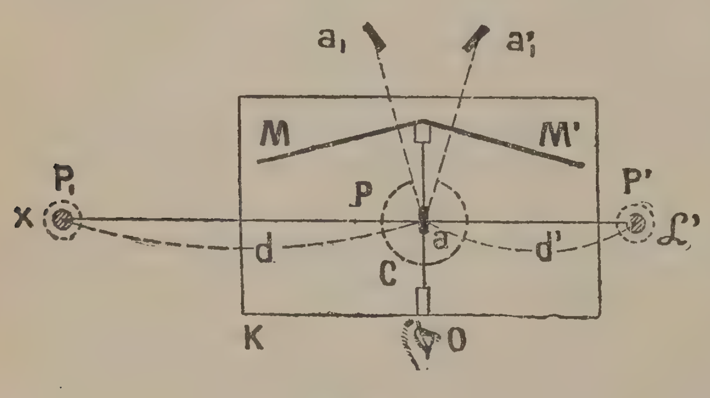


Fig. 41.

L'écran porte une tache *a* de papier translucide (obtenue en trempant une petite rondelle de papier dans la paraffine fondue, et laissant ensuite sécher ; puis on la rapporte à l'écran C, découpé en son centre pour recevoir cette rondelle que l'on colle sur les bords) ; une 2[e] colonne verticale P, invariablement reliée à la colonne P, par un bras métallique, porte la lampe-étalon (d'intensité horizontale $\mathcal{L}'$) qui se trouvera toujours ainsi à la distance fixe d' de l'écran (distance *connue*). La lampe à essayer, d'intensité inconnue X, est disposée sur un support mobile P_1, dont on règle la distance d à l'écran, de façon que l'œil de l'observateur, placé en O (dans le plan de l'écran) voie les images a_1 et a'_1, de a, fournies par les miroirs également inclinés, avec le *même éclat* ; il suffit alors d'appliquer la formule 34 ; car la droite qui joint les 2 foyers lumineux est normale à l'écran C.

N. B. — Cet appareil convient pour la comparaison de sources de même couleur ; — pour 2 sources de couleurs légèrement différentes, un œil exercé peut obtenir l'égalité d'éclat à 2 ou 3 °/₀ près. On opère en *chambre noire*, afin d'éliminer les éclairements parasites dûs aux surfaces réfléchissantes voisines de l'appareil.

N. B. — Pour éviter les calculs de $\left(\frac{d}{d'}\right)^2$, le constructeur fournit avec l'appareil une bande de calicot facile à dérouler et qui est tendue entre C et la lampe X; on a imprimé sur cette bande les nombres 1, 2, 3, etc., 25, 26, etc., 50, qui signifient : $\left(\frac{d}{d'}\right)^2 = 1$, ou 2, ou 3, ou 25, ou 50; correspondant à : $d = d'$; $d = d'\sqrt{2}$, et $d = d'\sqrt{25}$, $d = d'\sqrt{50}$ En général on a : $d' = 25$ cm. dans cet appareil; la bande en calicot porte aussi une division en centimètres et millimètres pour évaluation directe des rapports $\frac{d}{d'}$. (Appareil de *la Société des Etablissements E. Ducretet*, Paris.)

76. *b*) **Photomètre Lummer et Brodhun.** — Il permet la comparaison de deux champs lumineux elliptiques concentriques fournis par les deux sources comparées, et de la manière suivante: les sources sont disposées en £ et £' (fig. 42), de chaque côté d'un écran en porcelaine C, renfermé dans une caisse métallique V pourvue de deux ouvertures circulaires égales en face des deux sources, et leur distance est perpendiculaire à cet écran; la lumière diffusée par les deux faces de cet écran (celle de gauche éclairée par £, celle de droite par £') est réfléchie, de chaque côté, par deux miroirs *m*,*m'* collés sur les parois latérales et verticales de la caisse V du photomètre (noircie intérieurement au noir de fumée), et tombe sur un système de deux prismes rectangles isocèles, en verre : A,B. La face hypoténuse du prisme A est sphérique, mais présentant une petite surface plane bien polie α par laquelle le prisme A est collé à la face hypoténuse du prisme B (ceci, à l'aide d'un peu de *baume* de même indice que le verre des deux prismes); par la petite surface de contact passent seuls les rayons réfléchis par *m*, — mais les rayons venant de *m'* subissent la réflexion totale sur la face hypoténuse de B. Ces 2 sortes de rayons tombent sur un système de prisme et de miroir *abch*, normalement à *ab*; il se produit réflexion ordinaire sur *ch* (surface argentée); et l'angle *c* étant, comme l'angle *h*, égal à 112°5 (l'angle *b* est droit, et *a* vaut 45°), le rayon réfléchi IR est parallèle à *ha*, subira donc la *réflexion totale* (1) sur *ba*, et sortira perpendiculairement à la face *ah*, c'est-à-dire dans l'axe du tube V, qui est celui de la loupe (LL') et qui passe par C. La double

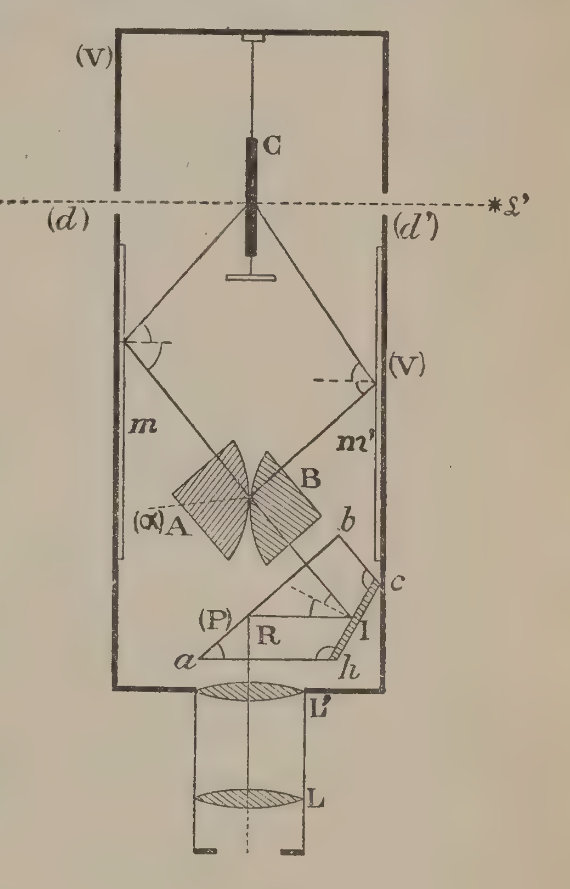


Fig. 42.

(1) Il est aisé de le vérifier par un calcul simple.

lentille LL′ à foyer assez long, et fonctionnant comme loupe composée, permet d'observer les 2 plages elliptiques éclairées et concentriques obtenues, dans la direction de C ; il faut la mettre *au point*, pour obtenir 2 images nettes.

En déplaçant l'une des 2 sources par rapport à l'autre, — ou le photomètre par rapport aux 2 sources, — le pied qui porte la caisse V, et ceux qui supportent les sources £ et £′ coulissent sur un banc horizontal portant une graduation en centimètres et millimètres, et permettant ainsi d'évaluer les distances de £ et £′ à l'écran C, — on obtiendra aisément l'*égalité d'éclat* des 2 plages éclairées, même quand les lumières comparées sont assez différentes (celle d'une lampe-carbone et celle d'une bougie; ou celles d'une lampe-carbone et d'une lampe-tungstène). Les plages obtenues étant *concentriques*, on saisit *mieux* qu'avec le photomètre précédent l'égalité d'éclat : la ligne de démarcation entre les plages (une ellipse) disparaissant totalement quand les 2 colorations égales se fondent l'une dans l'autre. On applique alors la formule 34 ci-dessus.

N. B. — La coloration des plages elliptiques est *jaunâtre* ; et l'on sait que la couleur jaune est très voisine de celle qui correspond à la *luminosité maxima;* les mesures avec ce photomètre sont donc faites avec un *bon éclairement*.

La caisse du photomètre peut tourner autour d'un axe horizontal (passant par l'écran) ; sa rotation est évaluée à l'aide d'un cercle fixe, disposé devant sa face antérieure (celle qui porte le tube à lentille L) et gradué en 360° ; on peut ainsi faire des essais sous diverses incidences, c'est-à-dire évaluer l'intensité d'une source sous *un angle donné*.

Quand la distance ££′ est de l'ordre du *mètre*, les mesures faites avec cet appareil sont obtenues à 2 ou 3 mm. près ; l'approximation est donc de 2 à 3‰, pour l'évaluation des distances des sources à l'écran photométrique.

N. B. — Cet appareil est construit par la maison F. Pellin (Successeur de Pellin frères); Paris.

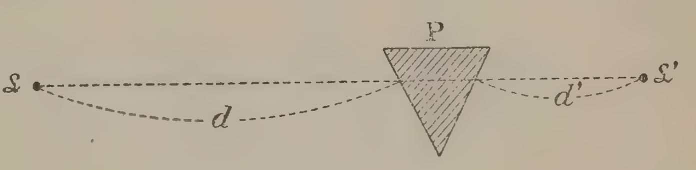
77. *c*) **Photomètre à scintillement**. — Il permet de comparer 2 sources de *couleurs différentes* : la lumière blanche d'une lampe au tungstène, et une lumière colorée : lumière *rouge* d'une lampe à incandescence recouverte d'un papier rouge, ou dont l'ampoule est peinte en rouge, ou d'une lampe *au néon* (voy. chapitre II ; II°) ; ou d'une lampe à vapeur de mercure (chap. II), ou d'une lampe à incandescence recouverte d'un papier vert : c'est donc un photomètre *hétérochrome*.

Il est très difficile, dans ce cas de photométrie hétérochrome, de juger exactement de l'*égalité d'éclat* des surfaces éclairées si différemment, même pour un *œil normal ;* il se produit, quand on laisse voir à l'œil chargé d'examiner, alternativement, 2 surfaces inégalement éclairées, une sensation dite de *papillotage* ou de *scintillement* ; si la *fréquence*

des alternances est suffisante, les 2 couleurs *se fondent* en donnant un champ d'*éclat uniforme* : le papillotage disparaît.

Un photomètre à scintillement sera donc un photomètre dans lequel un dispositif quelconque *masquera* successivement, l'une et l'autre des 2 plages inégalement éclairées, mais à intervalles très rapprochés (une dizaine de fois par seconde). Par exemple, avec le *photomètre* de *Lummer* et *Brodhun*, il suffira de disposer, devant les ouvertures *d*, 2 disques opaques (noircis), reliés invariablement à un mécanisme qui les fasse osciller rapidement de façon à masquer et rétablir successivement, l'une après l'autre, les radiations émises par $\mathcal{L}$ et $\mathcal{L}'$; quand la fusion des éclats, obtenue par un déplacement convenable de l'une des 2 sources, a été établie, on applique la formule générale de l'égalité d'éclairements (form. 34).

— Un *photomètre spécial à scintillement* est celui de Rood (fig. 43) ; les surfaces de comparaison sont les 2 faces recouvertes de chaux d'un prisme isocèle P opaque, et également inclinées sur la ligne $\mathcal{L}\mathcal{L}'$ ($\mathcal{L}$ et $\mathcal{L}'$ sont les sources à comparer, de couleurs différentes) ; on observe les deux plages, alternativement, en fixant l'œil à l'ouverture O du tube T, à l'aide d'une lentille divergente L, mue mécaniquement, dans la direction XY, en *oscillant* une dizaine de fois par seconde ; on obtient aisément la disparition du papillotage, en réglant les distances *d* et *d'* des 2 sources par rapport aux faces du prisme.



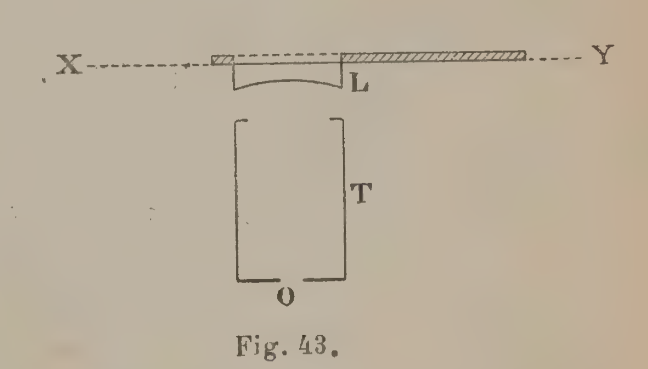


Fig. 43.

78. *d*) Remarques. — 1° On obtient la comparaison des *intensités* des *radiations monochromatiques de même longueur d'onde* de 2 sources de couleurs différentes, par la méthode du *spectrophotomètre* : la fente de cet appareil est éclairée : la moitié par l'une des 2 sources, l'autre moitié par l'autre source ; un diaphragme limite, dans les 2 spectres superposés et où les radiations de même longueur d'onde se correspondent, un intervalle étroit dans lequel on fait la *comparaison* ; on peut obtenir l'égalité d'éclairement, successivement pour les radiations simples (jaunes d'abord, vertes ensuite, etc...) ; la superposition des résultats obtenus peut donner une idée assez approchée de la comparaison des radiations totales, si les 2 couleurs composées ne sont pas trop différentes.

La comparaison des radiations voisines de celle du maximum de luminosité, fournit une indication assez approchée des intensités lumineuses totales des 2 sources (on opère avec les radiations jaunes).

2° On emploie aussi, pour comparer les éclats des surfaces également éclairées par 2 sources de compositions peu différentes, la méthode de l'ACUITÉ VISUELLE (voy. § 69, *a*) : des *traits fins* sont gravés sur un écran en verre dépoli, que l'on dispose, successivement, à une distance convenable de chacune des 2 sources, pour permettre au même œil placé à distance invariable, de distinguer nettement les caractères tracés ; on repère les distances obtenues pour chacune des 2 sources à l'écran, et l'on applique la formule de l'égalité d'éclairements. Mais il faut dire que l'approximation obtenue dans les résultats de cette méthode est peu comparable à celle que donnent les photomètres décrits antérieurement ; elle varie même, avec le même observateur, — car il faut tenir compte de la fatigue de l'œil due à l'observation prolongée d'objets de faibles dimensions.

3° Dans l'évaluation de l'*égalité d'éclats*, il se présente 2 phénomènes particuliers qui intéressent l'œil de l'observateur, et qu'il importe de signaler.

α) Le *phénomène* de *Purkinje* consiste en ceci : la plus grande sensibilité d'appréciation de l'œil est déplacée vers les radiations *bleues*, quand l'éclat d'une surface éclairée faiblit ; si l'on opère la comparaison de 2 lumières dont l'une est *bleue*, et en modifiant l'éclat de la surface éclairée, on arrive à des résultats très différents.

Pour éliminer le phénomène en question, dans la comparaison des éclairements avec un photomètre quelconque, il faut placer les sources à comparer à une distance telle de l'écran, que l'éclairement obtenu soit au moins égal à *10 lux* (ce qu'il est facile d'évaluer *a priori*, avec la *formule de l'éclairement*), dans les essais aux photomètres, on s'arrange toujours pour qu'il en soit ainsi.

β) Le *phénomène* de *Macé de Lépinay et Nicati* intéresse la sensibilité de la rétine, laquelle est très différente pour les couleurs différentes ; la « *tache jaune* » n'est formée que de *cônes* en son centre (voy. *Traité d'optique*) ; et les cônes sont impressionnés par les éclairements plus considérables, ils donnent la « sensation de couleur », et sont les plus sensibles aux *radiations jaunes ;* au contraire, les *bâtonnets* qui se trouvent *autour* de la tache jaune ne donnent pas la sensation de couleur, ils sont les plus sensibles aux *radiations vertes*, ils interviennent pour les éclairements plus faibles. En conséquence, quand on *diminue l'éclairement* — ou que l'on augmente le champ de vision, — les bâtonnets sont les plus *impressionnés* et la sensibilité de la rétine se déplace au-delà du *vert*, c'est-à-dire vers *le bleu* ; il faut donc un éclairement assez grand (supérieur à 10 lux), et un champ de vision faible ($\leqq 2°$ seulement). La sensibilité de l'œil, pour le *scintillement*, est très bonne dans les *mêmes conditions* d'éclairement et de champ de vision.

N. B. — Nous dirons quelques mots, plus loin, d'une *méthode photométrique physique* qui permet d'opérer en *dehors de l'œil*.

4° L'emploi d'un *écran coloré* devant une lampe à incandescence étalonnée permettra, par la méthode du photomètre à scintillement, de déterminer une fois pour toutes le *coefficient d'affaiblissement* de cet écran, — ou, au contraire, son *coefficient de transparence* pour la lumière de la lampe étalonnée, et l'on pourra ensuite s'en servir comme *d'étalon de lumière colorée*.

79. II. **Mesures photométriques.** — (*intensité lumineuse horizontale ; intensité sous divers angles*).

a) **Méthodes à suivre.** — On obtient l'*intensité lumineuse horizontale*, L_h d'une lampe à incandescence, en la disposant comme il a été indiqué déjà aux § 75 et 76, en face de l'écran du photomètre ; de façon à ce que la ligne droite qui joint les centres des foyers de lumière comparés soit *normale* à l'écran ; mais il s'agit d'évaluer l'intensité horizontale *maxima* (la plus *avantageuse*).

1° Si la lampe est à filament en *boucle* (*lampe-carbone*), l'*intensité lumineuse horizontale maxima* est celle des radiations émises horizontalement et *perpendiculairement à la boucle* : il faut disposer la lampe à essayer de manière que le centre de figure de la boucle se trouve en face du centre de figure de la lampe-étalon (flamme d'une bougie, flamme Heffner, ou *lampe semblable étalonnée*) ; l'intensité évaluée dans le *plan de la boucle* est *beaucoup plus faible*, donc *moins avantageuse*.

Quand il s'agit de *lampes-métal* (filament en *zig-zags*), on estime que l'intensité lumineuse horizontale maxima doit être évaluée dans le plan horizontal de symétrie du filament (lequel est régulier autour du *pied* de la lampe, donc autour de son axe vertical de symétrie) ; elle est d'ailleurs égale dans toutes les directions de ce plan horizontal, le filament étant régulier. S'il s'agit de *lampe-métal* (en *atmosphère gazeuse*), nous savons que le filament est irrégulièrement disposé autour de l'axe vertical de symétrie ; l'*intensité horizontale maxima* sera évaluée *dans le plan* de ce filament, et selon l'axe horizontal de symétrie du filament, lequel sera toujours dirigé normalement sur l'écran, celui-ci étant en face du sommet du filament polygonal.

2° Une fois installée comme il convient *au point de vue photométrique*, la lampe est reliée à une prise de courant (continu, ou alternatif ; nous supposons les mesures faites en courant continu ; nous ferons ensuite quelques observations au sujet de l'emploi du courant alternatif), et selon le dispositif indiqué fig. 30, afin d'évaluer les constantes électriques, en *faisant varier* la *tension* aux *bornes*, comme nous l'avons vu ; — on détermine généralement 2 ou 3 valeurs de L_h selon la tension E aux bornes, et *autour* de la *valeur normale* de E indiquée par le constructeur. Pour l'obtention de chacune de ces valeurs de L (horizontales), l'on prend soin de vérifier, à chaque instant, le réglage de la flamme-étalon, — ou la tension aux bornes de la lampe à incandescence

étalon (laquelle doit demeurer *constante* pendant toutes les mesures, et égale à la *tension normale indiquée*).

3° Il s'agit de *choisir*, parmi les 2 ou 3 valeurs trouvées pour L, dans le voisinage de L_h indiquée par le constructeur, celle qui doit être retenue comme intensité horizontale normale ; on calcule, à cet effet, la *puissance* P du courant d'alimentation (on en obtient aussi 2 ou 3 valeurs, correspondant aux 2 ou 3 valeurs de E déterminées), et la résistance R à chaud (on obtient 2 ou 3 valeurs de cette résistance). On *adopte*, après comparaison des diverses valeurs trouvées, celles qui se rapprochent le plus (pour P et R) de celles que l'on a déterminées antérieurement et qui correspondent à une lampe-étalonnée du même type. Nous savons (à la suite de *nombreux essais antérieurs*) que la puissance normale P_n et le rapport $\frac{R_n}{R_o}$ ont des valeurs très sensiblement les mêmes pour toutes les lampes de *même puissance lumineuse* : il est donc facile de s'arrêter aux valeurs à attribuer à L_h et à E_n (normales), pour chaque type de lampe (carbone, ou métal, à vide, ou à gaz).

N. B. — Les autres valeurs déterminées dans le voisinage de L_h et de E^n serviront ultérieurement, à calculer une relation entre E et L utile à connaître pour juger de variations de l'intensité lumineuse avec la tension électrique aux bornes.

4° Si l'on a à essayer *plusieurs types de lampes* de même catégorie (du même constructeur), mais ayant des puissances lumineuses très différentes (25, 50, 100, 200, 400, 600 bougies décimale, et plus), il importera de procéder de la façon suivante; on étalonnera, avec soin, une *lampe de chaque type*, afin de pouvoir comparer, *ultérieurement*, des lampes de même intensité ; nous allons justifier cette manière de procéder.

80. *b*) **Avantage des étalons intermédiaires.** — Nous avons vu que, pour permettre à l'œil d'opérer dans de bonnes conditions de sensibilité, il fallait comparer, sur l'écran d'un photomètre, des plages dont l'éclairement ne soit pas inférieur à 10 lux ; plus l'éclairement *sera fort*, plus facile sera l'établissement de l'*égalité d'éclat des éclairements*.

Dans ces conditions, il sera avantageux, si l'on se reporte à la formule 34, $L = L'_i \times \left(\frac{d}{d'}\right)^2$, de faire dans toutes les mesures : $d + d' = 1$ mètre.

Si, par exemple, on essaie une lampe de 25 bougies avec une autre lampe étalonnée de 25 bougies, on trouvera : $\frac{d}{d'} = 1$; comme le photomètre de Lummer et Brodhun (*le meilleur*) donne d et d' à 2 mm. près par exemple, les erreurs relatives commises sur les lectures de d et d' qui valent chacune très sensiblement 50 cm., puisque $d + d' = 1$ m.),

seront : $\frac{2}{500}$; pour le quotient $\frac{d}{d'}$, l'erreur relative vaudra $\frac{2 \times 2}{500} = \frac{8}{1.000}$; et l'erreur relative sur le carré $\left(\frac{d}{d'}\right)^2$, sera 2 fois plus grande, ou : $\frac{16}{1.000}$; on voit ainsi que l'on obtiendra aisément L avec une approximation voisine de 2 %.

Si l'on essayait, au contraire, une lampe de 25 bougies avec un étalon de 1 b. $^1/_4$ on obtiendrait : $\left(L = L' \times \frac{25}{1,25} = 20\ L'\right)$ et : $\left(\frac{d}{d'}\right)^2 = 20$; d'où $\frac{d}{d'} = \sqrt{20} = 2\sqrt{5} = 4,46$; ce qui donne, par un calcul simple : $d' = 18$ cm. 3 ; $d = 81$ cm,7 ; les erreurs relatives possibles dues aux lectures seraient alors pour d : $\frac{2}{817}$; pour d' : $\frac{2}{183}$; et pour $\frac{d}{d'}$: $\frac{2}{817} + \frac{2}{183} = \frac{13,4}{1.000}$; et enfin pour $\left(\frac{d}{d'}\right)^2$, l'erreur relative serait double soit : $\frac{26,8}{1.000}$; on aurait ainsi L avec une approximation près de 2 fois plus faible qu'avec une lampe étalon de 25 bougies ; cette approximation diminuerait encore, comme les calculs précédents le montrent aisément, si l'on comparait des lampes de 50, 100 bougies, avec un étalon de 1 bougie $\frac{1}{4}$, ou de 5 bougies. D'où nécessité d'*étalons intermédiaires.*

81. *c*) **Intensité sous divers angles.** — Outre l'intensité horizontale maxima, il importe de mesurer les *intensités sous divers angles* ; soit parce que dans l'éclairage usuel, les lampes sont situées au-dessus des tables de travail, et que l'on a besoin de connaître l'éclairement en divers points d'une salle où arrivent obliquement les radiations éclairantes ; soit parce que la connaissance des intensités obliques permettra d'établir la *courbe de distribution* de la lumière autour du filament, et d'en déduire ensuite l'*intensité moyenne sphérique.*

Pour mesurer les intensités obliques on emploie, soit le *photomètre de Lummer et Brodhun*, soit le *photomètre de Bunsen-Burel.*

Dans le 1er cas, on repère par une visée préliminaire (obtenue à l'aide d'un *azimuth* placé près de la lampe à essayer) un angle d'inclinaison quelconque, 30° par exemple, au-dessous de l'horizon de la lampe ; et l'on tourne la caisse du photomètre de 30° sur son axe horizontal, de façon à présenter l'écran normalement aux rayons à 30° de la lampe ; mais dans ce cas, l'*étalon* situé de l'autre côté de l'écran devra être disposé *obliquement* et à 30° sur la verticale (cas d'un *étalon à incandescence*), de façon à ce que l'autre face de l'écran reçoive les rayons éclairants dus à l'intensité horizontale maxima de cet étalon ; (cette manœuvre ne serait pas possible avec un étalon à flamme). On opérerait

d'une façon analogue pour obtenir l'intensité sous l'angle de 45°, sous l'angle de 60°, etc.

Dans *tous les cas*, et quel que soit le photomètre, on opère plus commodément de la manière suivante (fig. 44). La lampe à essayer est en F, à une certaine hauteur au-dessus du plan horizontal moyen de l'écran C du photomètre. Un cercle *azimuthal* a permis de tracer les angles remarquables (30°, 45°, 60°, 90°) au-dessous de l'horizon F*h*; un miroir argenté S, articulé autour d'un axe horizontal A, permet d'envoyer, *toujours horizontalement* sur l'écran C les rayons à utiliser pour l'essai : il suffit de tourner le miroir sur son axe, et de le déplacer convenablement pour que les rayons réfléchis aient toujours la direction SaF'; en F', à distance repérée, est la lampe-étalon, qui envoie ses rayons horizontaux sur l'écran (on connaît donc son intensité maxima horizontale L', sous une tension que l'on maintient constante).

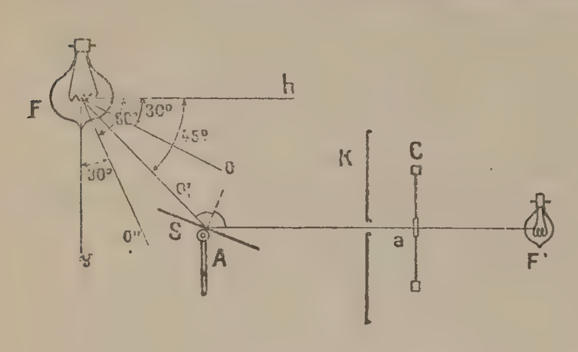


Fig. 44.

Un écran noirci percé d'un trou K, est disposé entre l'écran C du photomètre et la lampe F, de façon à ne laisser tomber sur C que les rayons réfléchis et à masquer ceux qui arriveraient directement de F.

Quant à la lampe F, pour *cette sorte d'essai*, on la maintient également à *sa tension normale*, — de façon à ce que les intensités lumineuses à relever L_{30^o} (à 30°), L_{45^o} (à 45°), L_v (verticale) se *correspondent toutes*.

N. B. — Le *pouvoir réflecteur* du miroir argenté étant égal à 0,97, il faut en tenir compte dans l'évaluation réelle de l'intensité ; de F en S, les rayons se transmettent intégralement (l'absorption due à l'air étant *négligeable ici*) ; de S en a, il ne passe que les 97 % du flux.

Si l'on néglige la perte par réflexion, les intensités obliques seront approchées de ce fait, à 3 % par excès.

Dans le cas de la figure, on aura : *d* (distance de la lampe à l'écran) = chemin brisé $\overline{FSa}$; et $d' = aF'$. On en déduit : $L_{45^o} = L' \times \left(\frac{d}{d'}\right)^2$.

82. *d*) **Exemples d'essais. (Lampes à ampoule claire).** — Voici quelques essais effectués sur *des types différents* de lampes a filament (*carbone* ou *métal*), avec des étalons différents ; ils fournissent tous l'intensité horizontale normale de chaque lampe examinée.

1° **Lampe au tungstène (vide), marquée 25 b.h. (bougie-heffner), sous 125 volts (tension normale) avec l'*étalon heffner* (à l'acétate d'amyle) *à flamme bien réglée* : 0 b.d. 895 ; photomètre Bunsen-Burel (fig. 41).**

La lampe a été maintenue sous 125 volts aux bornes pendant toute la

durée de l'essai; pour l'intensité horizontale nous avons obtenu : $d =$ (distance de la lampe essayée à l'écran) $= 124$ cm. 85; d' (constante) $= 25$ cm.; d'où $\left(\frac{d}{d'}\right)^2 = \left(\frac{124,85}{25}\right)^2 = 24,94$; d'où : $L_h = 24$ b.h. 94; en *bougies décimales* on aura : $L_h = 24,94 \times 0$ b.d. $895 = 22$ b.d. 32; nous avons pris 22 b.d. $^1/_3$.

Remarque.—Cette lampe construite par la A.E.G. est à *ancien filament* de tungstène *filé à la presse* (1912).

Nous avons ensuite déterminé (dispositif de la fig. 44), et en *bougies décimales*, les intensités sous divers angles au-dessous de l'horizon; le tableau ci-dessous reproduit les résultats obtenus :

N. B. — Toutes les lectures de d et d', avec le photomètre Bunsen-Burel, sont faites avec une erreur absolue probable de 4 à 5 mm; un calcul analogue à celui du § 80 montrerait que (L) est obtenue ici avec une approximation voisine de 4 %.

Intensités lumineuses (*en bougies décimales*)	L_v	L_{70}	L_{60}	L_{50}	L_{40}	L_{30}	L_{20}	L_{10}	L_h
Au-dessus de l'horizon..	$1\,^3/_4$	$4\,^1/_2$	9	$12\,^1/_2$	$15\,^2/_3$	$18\,^3/_4$	$20\,^1/_2$	$21\,^1/_2$	»
Horizontale maxima...	»	»		»	»	»	»	«	$22\,^1/_3$
Au-dessous de l'horizon.	$3\,^2/_3$	9	$11\,^2/_3$	$15\,^1/_4$	18	$19\,^2/_3$	21	$21\,^1/_2$	»

Remarque. — L'examen de ce tableau nous montre que, jusqu'à 20° (au-dessus ou au-dessous de l'horizon, les intensités lumineuses *diminuent peu*; au-delà de 20°, et jusqu'à la verticale, elles *décroissent* davantage *au-dessus* qu'au dessous, ce qui s'explique ainsi : le culot *arrête* une partie des radiations vers le haut; mais ces radiations se réfléchissent vers le bas, grâce à la calotte de verre qui termine l'ampoule du coté du culot, et s'ajoutent aux radiations sous l'horizon; c'est donc l'intensité horizontale qui est *maxima*. — Nous verrons comment, à l'aide des résultats d'un tableau comme celui qui précède, on peut établir la *distribution* de *la lumière* autour du filament en la représentant par un *graphique* (voy. §. 91).

83. 2° **Lampe au tungstène** (*vide*), marquée $5^{b.d.}$ — **115ᵛ**; de la *Cie lorraine des lampes* (type-Faust; 1924); comparée à la *bougie française de l'Etoile* ($1^{b.d.}25$) à flamme blanche de 4 cm. de hauteur, réglée; Photomètre *Lummer et Brodhun*.

Nous avons mesuré l'intensité horizontale maxima de cette lampe, sous les tensions égales à 105^v, 112^v, 116^v 1/2, et 121^v. Le tableau suivant reproduit les résultats obtenus, en posant : $L' = 1^{b.d.}25$ (étalon), $d' =$ distance de l'étalon à l'écran; $d =$ distance de la lampe essayée à l'écran; $d + d' = 1$ m.; on faisait varier la position du photomètre sur le banc,

de façon à obtenir l'*égalité d'éclats* des 2 champs elliptiques, — égalité obtenue à 2 mm. près sur d ou d'. Formule : $L = L' \times \left(\frac{d}{d'}\right)^2$.

E^v	105	112	116,5	121
d cm.	68,1	70,6	72	74
d' cm.	31,9	29,4	28	26
L' b.d.	1,25	1,25	1,25	1,25
L b.d.	5,7	7,2	8,4	10
I^a	0,0925	0,0950	0,0985	0,1050
P^w	9,71	10,64	11,47	12,70

Nous faisons figurer aussi, dans le tableau, les valeurs du courant d'alimentation I (ampères) et la puissance P (watts).

La tension indiquée par le constructeur est (110^v-115^v) ; mais l'examen de la puissance P absorbée, et du coefficient $\frac{R_n}{R_o}$ (voy. § 79. 3°), nous a fait adopter comme *tension normale* : 115^v; l'intensité L_h vaut alors : $8^{b.d.}$,04 (on prend : $8^{b.d.}$) ; et l'on a : $I_n = 0^a0975$; d'où : $P_n =$ 11 watts 21.

N. B. — Nous verrons un peu plus loin (§ IV°. *Constantes électro-optiques*) comment nous avons calculé L_h (normale), sous $E_n = 115^v$; et nous montrerons la VALEUR de la lampe *ainsi étalonnée*, comme *étalon auxiliaire* pour les *essais ultérieurs*.

84. 3° **Lampe au tungstène** (*vide*), marquée 50^b sous 110^v-115^v; (Type *Faust*) ; étalon employé : lampe Faust (vide) marquée 5^b étalonnée précédemment) ; photomètre Lummer et Brodhun.

La lampe-étalon est maintenue à la tension constante de 121 volts, et donne alors : $L' = 10^{b.d.}$. On fait : $d + d' = 1^m\,1/2$, pour obtenir 2 plages *bien éclairées*.

Nous avons déterminé 3 valeurs de L sous 106, 113 et 121 volts ; et nous avons obtenu les résultats suivants (avec la formule 34) :

E^v	106	113	121
d cm.	103,3	106,7	110,2
d' cm.	46,7	43,3	39,8
L' b.d.	10	10	10
L b.d.	48,5	60,7	76,7

Ces 3 valeurs de L sont destinées à étalonner la lampe, qui servira également d'étalon secondaire (voy. § IV°). Sous 115ᵛ (tens. normale), elle donne : $L_h = 64^{b.d.}3$ avec $P_n = 56^{w}18$.

N. B. — Cette lampe a permis d'étalonner la *lampe Faust* (vide) marquée 32^b sous 110^v-115^v ; cette dernière a fourni sous 110^v (tens. normale) : $L_h = 44^{b.d.}2/3$.

85. 4° **Lampe au tungstène** (gaz), marquée $50^{b.h.}$ sous 115^v-120^v (*Type Philips*) ; étalon employé : lampe Faust (vide) marquée 32^b (étalonnée au préalable) ; même photomètre. Lampe étalon maintenue sous 118^v, elle donne alors : $58^{b.d.}4$; on fait $d + d' = 1^m$.

Nous avons déterminé 2 valeurs de L pour cette lampe qui servira d'*étalon* pour les *lampes* en *atmosphère gazeuse*.

E^v	113	117,5
d cm.	43,6	45,6
d' cm.	56,4	54,4
L' b.d.	58,4	58,4
L b.d.	34,9	41

N. B. — Cette lampe Philips, — remarquablement comparable à elle-même pendant tous les essais ultérieurs, — d'une heure chacun —, donne $L_h = 45^{b.d.}5$ sous $E_n = 120^v\ 1/2$, avec $P_n = 38^w2$.

86. 5° **Lampe Faust** (gaz), 50^b (115^v), et **lampe Mazda** (de la Cie des Lampes-Métal, Paris) (gaz), 110^v, 50^b ; *étalon Philips* (gaz), étalonnée précédemment, marquée $50^{b.h.}$; et qui donnera sous la *tension constante* de 120^v5, maintenue pendant les essais, $L' = 45^{b.d.}5$.

Résultats des mesures :

L. Faust (gaz)				Lampe Mazda (gaz)				
E^v	110	120,5	Tension normale : 118ᵛ ;	E^v	108,5	114,5	120,5	Tension normale : 112ᵛ ;
d cm.	47,8	52,2	L_h = 50 b.d. 4	d cm.	50,1	53	55,2	L_h = 52 b.d. 5
d'	52,2	47,8	P_n = 43 w. 13	d'	49,9	47	44,8	P_n = 45 w. 50
L'	45,5	45,5		L'	45,5	45,5	45,5	
L b.d.	38,2	54,2		L b.d.	45,9	57,8	69,2	

Remarque. — Il est intéressant de comparer ces 3 lampes en atmosphère gazeuse, de 50^b indiquées, et de construction différente (2 lampes françaises : Faust, Mazda ; 1 lampe hollandaise : Philips) ; les deux

lampes françaises donnent des résultats très voisins (pour L_h et P_n) ; la lampe Philips, étalonnée par le constructeur en b. heffner, a donné : $L_h = 45$ d. d. 5, ce qui équivaut en *bougies heffner*, à : $\frac{45,5}{0,895} = 50$ b. heff. 8. Cette lampe, au point de vue *consommation spécifique* (voy. § IV°, 3°) est absolument comparable aux 2 autres.

87. 6° **Lampe carbone.** — (*Faust*), marquée 32^b-110^v (étudiée déjà pour sa caractéristique, au § 54 ; fig. 32 ; courbe C) ; lampe-étalon : lampe Faust (vide) 50^b, étalonnée au § 84. Nous avons comparé la lampe-carbone à une lampe au tungstène dans le vide, dont la température normale du filament est *moins éloignée* de celle du filament de carbone ; les plages de l'écran ont des couleurs un peu différentes, mais demeurent toujours dans le ton jaune ; il est très facile d'obtenir la fusion des éclats.

L'étalon, *maintenu à* 119^v, donnait : $L' = 72$ b. d. 4 ; nous faisions : $d + d' = 200$ cm. ce qui fournissait un *bon éclairement* des 2 plages (supérieur à 50 lux pour les 2 lampes essayées), et une *meilleure approximation* (*erreur relative* $< \frac{1,5}{100}$ pour la mesure de L). Le tableau suivant fournit les résultats obtenus :

E^v	110^v	119^v
d cm.	85,5	97,5
d' cm.	114,5	102,5
L' b.d.	72,4	72,4
L b.d.	40,4	66

la tension normale de cette lampe est : $E_n = 110$ volts ; on a : $L_h = 40$ b.d. 4 ; avec $P_n = 75$ w. 35.

88. 7° **Lampe intensive Nernst** (*filament d'oxydes rares*). — Cette lampe, construite pour notre Laboratoire de l'École d'A. et M. d'Aix (en 1908), a été étalonnée en la comparant à la *bougie heffner* (0 b. d. 895), bien réglée. La disposition du filament (appliqué horizontalement contre la plaque K, fig. 28, I), explique que les radiations visibles sont toutes *au-dessous* de l'horizon.

Courant d'allumage : 0^a, 90 (au début) ; descend assez vite à 0^a, 775 ; et conserve cette valeur jusqu'à l'incandescence du bâtonnet (1/2 minute) ; dès apparitions de l'incandescence du bâtonnet, on a : 1^a, 10 (la spirale et le bâtonnet sont alors en dérivation l'un sur l'autre aux bornes de la lampe, pendant un instant très court) ; le courant descend

alors à $0^a,85$, valeur qu'il conservera tout le temps que durera l'essai, sous 101 volts.

Résistance normale de la lampe : $R_n = \frac{101}{0,85} = 118$ ohs 8; la lampe est donc disposée pour les mesures selon la fig. 30.

Nous avons mesuré au photomètre Bunsen-Burel, les intensités lumineuses : horizontale maxima (perpendiculairement au filament) : L_h ; verticale (la plus grande, puisque la plaque de porcelaine sert de réflecteur) : L_v ; et l'intensité à 45° sous l'horizon : L_{45} ; nous avons exprimé en bougies-décimales, les résultats obtenus :

$L_h = 52$ b.d.; $L_{45} = 67$ b.d.; $L_v = 92$ b.d.

Puissance normale ($I_n = 0^a85$; $E_n = 101^v$) : $P_n = 85^w85$.

89. *e*) **Lampes avec écrans colorés.** — 1° Nous avons, par la méthode du scintillement, mesuré les intensités lumineuses horizontales maxima d'une *lampe Mazda* (50 b. d.) à filament en atmosphère inerte, et dont l'ampoule était *entièrement recouverte* d'un papier de couleur de $\left(\frac{1}{20}\right)$ mm. d'épaisseur (mesurée au *palmer*) ; nous avons utilisé, successivement, du *papier vert*, du *papier jaune*, du *papier rouge*. La lampe étalon était une lampe Philips (à filament en atmosphère gazeuse, également), marquée 50 b. h. sous 120^v 1/2, à *ampoule nue*. Nous avons aussi déterminé l'intensité d'une autre lampe Philips *identique*, à ampoule recouverte de papier rouge. La lampe-étalon Philips, maintenue sous tension constante et égale à 120^v, donnait : $L' = 44$ b. d. 7, photomètre *Lummer et Brodhun* avec *dispositif* pour le *scintillement*; $d + d' = 1$ m. (un bon éclairement est ici nécessaire, les plages colorées étant très différentes, surtout avec le vert et le rouge).

Les tableaux ci-après reproduisent les résultats de nos mesures avec ces lampes de 50 b.

	Mazda (rouge)		Mazda (jaune)		Mazda (vert)		Philips (rouge)	
E^v	107,5	120	108	120	107	120	110	120
d cm.	36,5	40,2	38,8	43,6	36	39,5	31	35
d' cm.	63,5	59,8	61,2	56,4	64	60,5	69	65
L' b.d.	44,7	44,7	44,7	44,7	44,7	44,7	44,7	44,7
L b.d.	14,7	*20,2*	18	*26,7*	14,1	*19,04*	9	*12,9*

2° Nous avons déduit, des tableaux qui précèdent, le *coefficient de transparence k* des écrans colorés pour chaque type de lampe, c'est-à-dire le rapport de l'*intensité horizontale maxima* avec écran coloré, à

l'intensité horizontale maxima fournie par l'ampoule *nue*, sous la même tension E = 120v (la lampe Mazda donne alors : 68 b. d. 25; la lampe Philips : 44 b. d. 7). Le tableau ci-après reproduit les valeurs de ce coefficient k :

ÉCRAN	MAZDA (50 b.)	PHILIPS (50 b.)
Vert.......	0,28	»
Jaune......	0,39	»
Rouge.....	0,29	0,29

Il est à remarquer que le *jaune* laisse passer plus de lumière que les 2 autres couleurs ; nous avons vu (§ 71) que c'est dans le *jaune* que se trouve le plus grand coefficient de luminosité; dans les 2 lampes de 50 b. (à filament de tungstène en atmosphère gazeuse, et présentant des caractéristiques très voisines), le coefficient de transparence pour le rouge est *le même.*

On pourra donc se servir de la lampe Mazda comme étalon de lumière (verte, rouge, ou jaune), en l'utilisant *sous la tension* correspondant aux coefficients de transparence ainsi déterminés. A une tension un peu plus faible (107v1/2), le flux lumineux qui traverse chaque écran diminue moins vite que l'énergie émise (la température diminue) et il est, dès lors, *relativement* beaucoup plus riche en radiations *rouges* et *vertes* et un peu plus riche seulement en radiations *jaunes*, qu'à une température plus élevée (celle qui correspond à 120v); les coefficients de transparence des mêmes écrans deviennent : 0,33 (rouge); 0,32 (vert); 0,40 jaune).

4° Intensité moyenne sphérique; Flux lumineux

90.— Ces 2 grandeurs sont *inséparables*; en effet, si nous nous reportons à ce qui a été dit au § 66, nous voyons que le flux en *lumens*, émis par une source ponctuelle de I bougie décimale placée *au centre* d'une sphère de rayon quelconque vaut : $F = 4\pi I$.

Or, nous venons de voir que l'intensité de la lumière émise par un filament de lampe varie avec l'inclinaison des rayons lumineux, ce qui tient à *la forme* du filament ; il faut donc définir l'intensité lumineuse d'une lampe qui serait égale *dans toutes les directions* autour du filament, et fournirait *le même flux sphérique* total que celui que donne la 1re lampe ; on donne à cette intensité lumineuse, le nom d'*intensité moyenne sphérique* (1) ; et nous la désignerons par L_s; de sorte que si F

(1) Ou *intensité globale moyenne* (Con internat. de l'Eclairage).

est le flux sphérique (1) (déterminé comme nous allons le voir) d'une lampe donnée, nous poserons : (28)' $F = 4\pi L_s$ (*lumens*).

Si l'on connait F, on en déduira L_s, ou vice-versa. Voyons comment on mesure ces 2 grandeurs.

Il existe à cet effet 2 méthodes, la *méthode graphique*, et la *méthode expérimentale* (dite : du *lumenmètre*).

91. *a*) **Méthode graphique** (*Lampes à vide*). — On peut évaluer F d'abord, et L_s ensuite, de la manière suivante. Prenons les résultats du tableau du § 82 (mesure des intensités sous diverses inclinaisons, d'une lampe au tungstène (vide), 25 *b. h.*, sous 125 volts.

Traçons, à partir du centre O du foyer lumineux de la lampe (centre de symétrie du filament en zig-zags où nous supposons *concentrée* l'intensité lumineuse de cette lampe, et d'où émane le flux lumineux), des rayons Oa, Ob, Oc, ... $O\alpha, O\beta, O\gamma$, etc. faisant entre eux des angles de 10°, et portons sur les directions de ces rayons, et à l'échelle de 1 m/m pour 1 bougie décimale, des *vecteurs* représentatifs des intensités déterminées comme nous l'avons fait (§ 82) ; la courbe obtenue en joignant d'un trait continu les extrémités des vecteurs (fig. 45) se nomme *courbe de distribution de la lumière* autour du filament : elle va nous permettre de mesurer l'intensité moyenne sphérique de la lampe : *c'est le quotient du flux lumineux émis par la lampe par la surface sphérique qu'il traverse* ; ceci résulte des définitions données aux § 66 et 68. Evaluons donc le flux en question, puis la surface sphérique traversée.

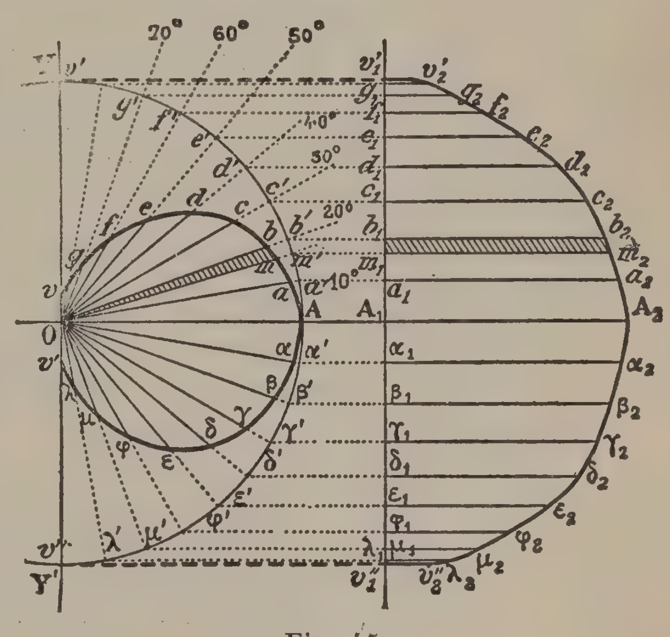


Fig. 45.

1° Traçons à cet effet la sphère de rayon OA égal à l'intensité maxima (dans ce type de lampe, et dans toutes les lampes à filament métallique dans le vide, il en sera *de même*) ; on a : $L_h = OA =$ intensité maxima; et prolongeons les rayons inclinés à 10° de la courbe $OdA\delta O$ jusqu'à la surface de cette sphère (dans le plan méridien vertical YAY'). Menons une droite perpendiculaire à OA, en dehors de la sphère, en A_1 par exemple ; et projetons sur cette droite les points d'intersection : a', b', c', etc., avec la méridienne YAY', des rayons Oa, Ob, Oc, etc., prolongés ; par ces points de projection, a_1, b_1, c_1, etc..., nous tracerons des perpendicu-

(1) Ou *flux global* (Con internat. de l'Eclairage).

laires à la droite ($\varphi'_1 A_1 \varphi''_1$), sur lesquelles nous porterons, à partir de la droite en question, les vecteurs : $A_1A_2 = OA$; $b_1b_2 = Ob$; etc... représentatifs des intensités correspondantes. La ligne obtenue en joignant d'un trait continu les extrémités : $\varphi'_2, c_2, b_2, A_2, \ldots \varphi''_2$ des vecteurs en question limite, avec les vecteurs extrêmes : $\varphi'_1\varphi'_2$, $\varphi''_1\varphi''_2$, et la direction $\varphi'_1\varphi''_1$, une surface dont l'aire : T cent. carrés va nous donner l'intensité moyenne sphérique cherchée L_s. Le flux lumineux élémentaire df dans l'angle solide infinitésimal (bOm) par exemple vaut, par définition, le produit de l'intensité lumineuse dans cet angle solide, soit Ob, par la surface qu'il traverse, qui est celle de la zone sphérique de rayon OA, de hauteur (b_1m_1), et qui vaut : ($2\pi \times OA \times b_1m_1$) ; on aura donc :

$$df = Ob \times 2\pi.OA \times b_1m_1.$$

Le flux *total*, à travers toute la sphère de rayon OA, traversée par le flux, sera donc la somme intégrale des flux élémentaires entre les limites : $Ob = O\varphi$, et $Ob = O\varphi'$; soit : $F = \int df = 2\pi.OA \int (Ob \times b_1m_1)$; mais l'on a : $Ob = b_1b_2$; d'où : $(Ob \times b_1m_1) = (b_1b_2 \times b_1m_1)$: ce produit représente l'aire du rectangle élémentaire ($b_1b_2m_2m_1$) ; et $\int (Ob \times b_1m_1)$ $= T =$ aire limitée par le diagramme — (c'est Rousseau qui a eu, le premier, l'idée de ce genre de diagramme) — de la figure de droite ; donc finalement :

$$F = 2\pi.OA \times T$$

La surface de la sphère : $4\pi \times \overline{OA}^2$, étant traversée par le flux F, et si L_s est l'intensité moyenne sphérique définie précédemment, il viendra :

$$(35) \qquad L_s = \frac{F}{4\pi \times \overline{OA}^2} = \frac{2\pi.OA \times T}{4\pi.\overline{OA}^2} = \frac{T}{2 \times OA} = \frac{T}{2 \times L_h}.$$

Il s'agit d'évaluer T en cent. carrés ; L_h en centimètres (à l'échelle indiquée), et l'on aura L_s en centimètres, que l'on traduira ensuite en *bougies décimales*.

A l'aide du *planimètre*, on obtient aisément T (en mesurant les rectangles élémentaires, et faisant leur somme) ; on peut encore employer une *pesée* : on découpe le diagramme, après l'y avoir dessiné, sur une feuille de papier métallique d'épaisseur constante et très faible ; on pèse la figure découpée, et on compare son poids à celui d'un centimètre carré découpé dans la même feuille (les poids sont proportionnels aux surfaces, dans ces conditions) ; le rapport de ces poids fournira le nombre qui mesure T. Dans le cas de la fig. 45, nous avons trouvé : T = 7 cent. carrés 7567 ; L_h (ou OA), vaut 2 centim. 233 (puisque L_h = 22 b. d. 33, représentées par 22 mm. 33) ; d'où (en *centimètres*) :

$$L_s = \frac{7{,}7567}{2 \times 2{,}233} = 1{,}74 ; \text{ ou : } 17 \text{ mm. } 4 ;$$

d'où enfin en bougies décimales :

$$L_s = 17 \text{ b. d. } 4$$

2° Le flux en *lumens* est facile à évaluer ; — le flux qui traverse la sphère de rayon OA, traverserait aussi la sphère concentrique de rayon 1 m., dont l'aire vaut : 4π m. carrés ; mais il s'exprimera alors en *lumens* (§ 66), et l'on aura : (36) F (*lumens*) $= 4\pi \times L_s$.

Dans le cas qui nous occupe, l'on trouve ; $F = 4 \times 3{,}14 \times 17{,}4 =$ 218,5 *lumens*.

92. **Remarque importante.** — Les constructeurs de lampes indiquent, en général, sur le culot, l'intensité horizontale maxima sous régime normal de tension indiqué en volts ; quelques constructeurs sont entrés dans la voie la plus logique, qui consiste à fournir l'intensité moyenne sphérique (*Cie Gle des Lampes-métal* ; *Cie lorraine des Lampes*) ; la *Société Philips* continue à indiquer *l'intensité horizontale maxima* ; d'autres indiquent *l'intensité horizontale moyenne* (obtenue en faisant la valeur moyenne des intensités horizontales, lesquelles sont inégales dans le cas d'un filament de carbone (boucle), ou d'un filament de tungstène (gaz) ; — il résulte de toutes ces notations diverses, une *confusion* dans l'esprit des consommateurs de courant électrique, — confusion qu'il serait aisé de faire disparaître, en indiquant le *flux* en lumens, sur les lampes ; d'où l'on déduirait l'intensité moyenne sphérique par un simple calcul).

93. *b*) **Coefficient de réduction sphérique.** — On donne le nom de coefficient de réduction sphérique (1), au quotient (37) : $c = \frac{L_s}{L_h}$.

On obtient ici, pour ce coefficient, $c = \frac{17{,}40}{22{,}33} = 0{,}78$;

Or, toutes les lampes au tungstène dans le *vide* à *ampoule nue*, et avec filament en zig-zags, donnent la même courbe de distribution des intensités lumineuses : celle de la fig. 45 ; nous accepterons donc, pour toutes ces lampes, la valeur : 0,78 pour le coefficient de réduction sphérique.

Nous donnerons sa valeur, en suivant, pour les autres types de lampes à incandescence.

94. *c*) **Méthode graphique** (*Lampes à atmosphère gazeuse*). — Le filament de ces lampes étant différent de celui des lampes à vide, le diagramme de Rousseau obtenu sera lui-même différent (fig. 46 et 47). Le filament est une hélice de tungstène à spires serrées, tendue faiblement entre les crochets des électrodes, comme nous l'avons vu (fig. 26) ; la ligne poly-

---

(1) Ou : facteur de réduction globale (Con intern. de l'Eclairage).

gonale non complètement fermée ainsi obtenue (de 5,6 ou 8 côtés), est dans un plan perpendiculaire à l'axe de symétrie de l'ampoule, dans les *lampes neuves*. Au bout de quelques heures d'incandescence, le filament s'*incurve*, quand il est *mince* (lampes de 25 à 400 bougies (fig. 46); au contraire, la ligne incandescente demeure dans le même plan, avec un filament plus gros (lampes de 600 à 1.000 bougies), fig. 47 : dans les lampes de 2.000 bougies et plus, le filament est en zig-zags, mais à *brins courts* : le diagramme *se rapproche* de celui de la figure 45, il est *intermédiaire* entre ceux des fig. 45 et 46 : nous en reparlerons plus loin.

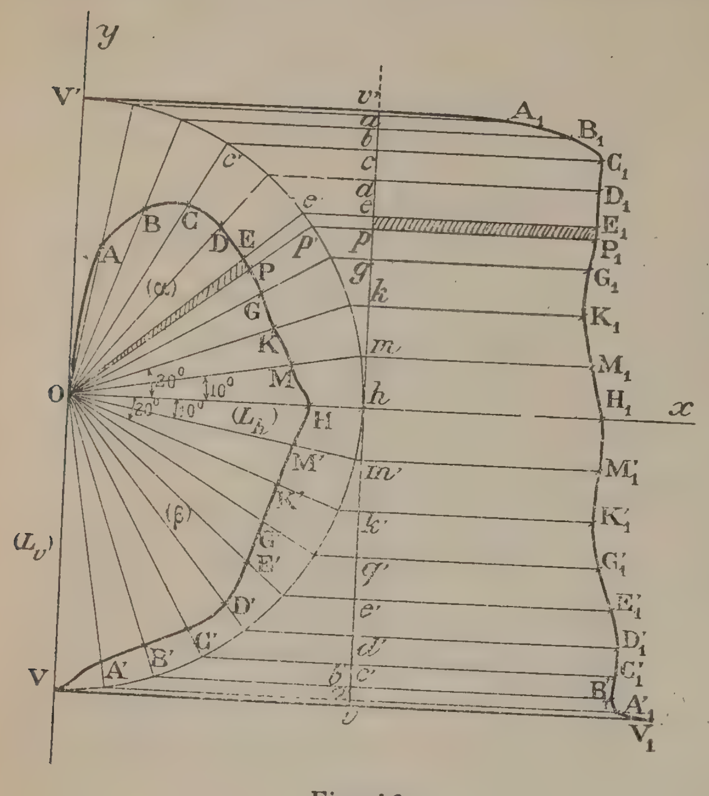


Fig. 46.

1° *Lampes de 25 à 400 bougies* ; le flux est plus intense dans la partie opposée au culot (β, fig. 46) ; dans le plan du filament (OH) l'intensité horizontale maxima est *moindre* que dans la région β, quelques boucles de la chaînette étant masquées par celles qui sont plus en avant (du côté le mieux éclairé) ; dans la région du culot (α) l'intensité est moindre encore.

Le graphique de la fig. 46 a été obtenu en opérant comme au § 91 ; les rayons sont inclinés de 10° en 10°, l'*intensité maxima* étant $L_v = OV$ (intensité verticale), la méridienne V*h* V′ a pour rayon OV; on a : $OH = L_h$; intensités *verticales* : au-*dessus* de OH = *nulle* ; au-dessous : OV.

Le flux élémentaire dans l'angle solide infinitésimal EOP, vaut (à travers la zone sphérique ($e'p'$) :

$$df = OE \times 2\pi . OV \times ep \, ;$$

d'où pour le flux total : $F = \int df$ (entre les limites : OE = 0, et OE = OV) $= 2\pi . OV \int (OE \times ep)$; mais : $(OE \times ep) = (eE_1 \times ep) =$ surface élémentaire hachurée ;

d'où : $\int (OE \times ep) =$ aire $(v' A_1 H_1 V_1 v) =$ aire T ;

d'où pour le flux total : $F = 2\pi . OV \times T$;

et l'intensité moyenne sphérique sera (comme au § 91) :

$$L_s = \frac{F}{\text{surface sphère } OV} = \frac{2\pi . OV \times T}{4\pi . \overline{OV}^2} = \frac{T}{2 \times OV} = \frac{T}{2 \times L_v}$$

On évalue T, comme nous l'avons dit déjà, en centimètres carrés; puis L_v en centimètres; on a L_s en centimètres; on traduit en bougies ensuite.

La fig. 46 a été relevée par nous, avec une *lampe Philips* de 100 bougies sous 115 v. (*ampoule* claire) ; nous avons trouvé, au photomètre : $(L_h) = 100$ *b. heffner* 3; $(L_v = 127$ *b. h.* 2; le *planimètre* a donné : T=33 centimètres carrés; *échelle employée* : 2 *b.h.* 75 par *millimètre* (1), soit 27 *b.h.* 5 par centimètre; d'où L_v (en centimètres) $= \frac{127,2}{27,5} = 4$ centimètres 625; par suite : $(L_s) = \frac{33}{2 \times 4,625} = 3$ cm. 57; ou, en bougies-heffner $= 3,57 \times 27,5 = 98,18$.

N.B. — En *bougies décimales*, on aura : $L_s = 98,18 \times 0,895 = 87$ *b.d.* 9; et le flux, en *lumens*, vaudra donc : F(*lumens*) $= 87,9 \times 4\pi = 1104$.

Le *coefficient de réduction sphérique* vaut, avec ce type de lampe : $c = \frac{L_s}{L_h} = \frac{98,18}{100,30} = 0,978$; nous prendrons $c = 0,98$ pour les lampes au tungstène à ampoule claire, en atmosphère gazeuse, de 25 à 400 bougies.

Le diagramme de la fig. 46 s'applique à tous les types de lampes (gaz) qui ont la *même forme* de *filament* (lampes Faust, Mazda, Fotos, etc.); et le coefficient $c = 0,98$, à tous ces types de lampes.

2° *Lampes de 600 à 1.000 bougies.* — Le maintien, dans le même plan, du filament incandescent (plus gros) a pour effet, il est aisé de le comprendre, un accroissement d'intensité lumineuse dans la région du culot (α; fig. 47); par contre, elle est *diminuée* dans le sens horizontal (OH), mais demeure toujours plus grande, et plus *régulière*, dans la partie β opposée au culot.

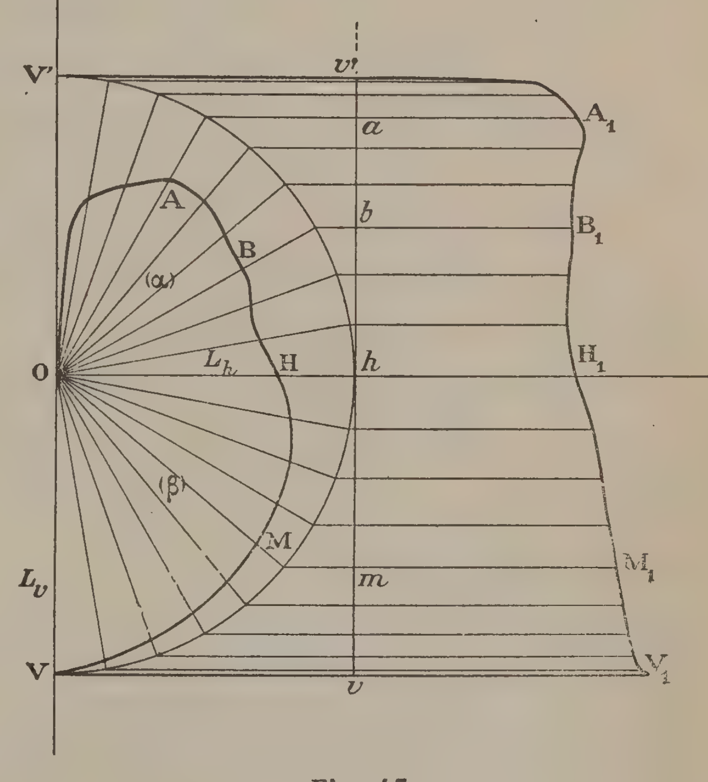


Fig. 47.

Le diagramme de la figure 47 a été fourni par une lampe Philips de 600 bougies sous 115 v., à ampoule claire; échelle employée : 1 cm. pour 172 b.h. 5 (2); nous avons trouvé au photomètre : $(L_h) = OH = 595$ b.h.;

(1; 2) Les fig. 46 et 47 sont réduites aux $\frac{3}{5}$ selon chaque dimension.

$(L_v) = OV = 798$ b.h.; et T (aire $\rho' A_1 V_1 \rho$) $= 33$ cm. carrés 38; on a, comme précédemment : $L_s = \frac{T}{2 \times OV} = \frac{T}{\frac{2 \times 798}{172,5}} = \frac{33,38}{2 \times 4,626} = 3$ centimètres 6 ; transformée en bougies-heffner, elle devient :

$$(L_s) = 3,6 \times 172,5 = 621 \text{ b.h.}$$

N.B. — En bougies décimales, on aura : $L_s = 621 \times 0,895 = 555$ b.d. 8; d'où, pour le flux en lumens : $F = 555,8 \times 4\pi = 6.980$ lumens 8.

Le *coefficient de réduction sphérique* vaut, avec cette forme de filament :

$$c = \frac{(L_s)}{(L_h)} = \frac{621}{595} = 1,04.$$

95. **Lampe-carbone** (*vide*). — En construisant un diagramme avec une lampe à filament de carbone (vide), de 32 sous 110 volts, on obtient une courbe de distribution de la lumière comme le montre la fig. 48 (courbe α en *pointillés*) ; on trouve : OH = (intensité *horizontale moyenne*) = 32 b.d. ; $L_v = OV = 22$ b.d. 5 ; $L'_v = OV' = 5$ b.d. 1/3 ; l'intensité horizontale est la *meilleure*.

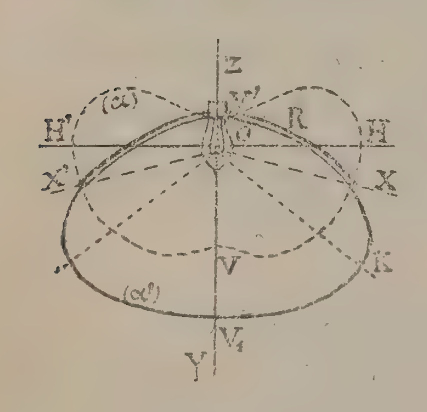


Fig. 48.

Dans le plan perpendiculaire à la boucle, l'intensité (maxima) vaut 1,2 fois plus que dans le plan de la boucle ; l'intensité OV' est la plus faible (le culot arrêtant les radiations vers le haut ; il les réfléchit, et les ajoute à celles qui sont émises vers le bas) ; l'intensité est donc meilleure au-dessous qu'au-dessus de l'horizon.

Le coefficient de réduction sphérique vaut, dans ces lampes : $c = \frac{L_s}{L_h} = 0,80$; il est un peu plus grand que pour les lampes au tungstène (*vide*).

96. **Lampe Nernst.** — Dans les lampes intensives (comme celle que nous avons essayée au § 88), la lumière est tout entière distribuée au-dessous de l'horizon ; on obtient la courbe de distribution de la (fig. 28. II) ; on a : L_v (intensité maxima) = 92 *b.d.* ; $L_{45} = 67$ b.d. ; $L_h = 52$ b.d. Le diagramme de Rousseau que l'on obtient avec cette courbe, donne : L_s (*hémisphérique inférieure* ; il n'y a pas de flux lumineux dans l'hémisphère supérieur) = 65 b.d.

Le coefficient de réduction sphérique se définit quelquefois, dans une telle lampe, par le rapport : $c' = \frac{L_s}{L_v}$ (parce qu'on l'utilise pratiquement pour son *intensité verticale*, qui est maxima) $= \frac{65}{92} = 0,70$. Evalué

comme dans les *autres lampes* il vaut : $c = \frac{L_s}{L_h} = \frac{65}{52} = 1{,}25$: la plus grande de toutes les valeurs fournies par les lampes à incandescence.

97. *d)* **Méthode expérimentale (lumenmètres).** — Certains appareils (*lumenmètres*) permettent d'obtenir *directement* le flux émis par une lampe électrique. Nous citerons le lumenmètre de M. A. Blondel, et celui de M. Ulbricht; et nous dirons quelques mots du lumenmètre physique.

1° **Lumenmètre A. Blondel.** — La lampe $\mathcal{L}$ est placée au centre d'une sphère de grand rayon S, *noircie* intérieurement au noir de fumée, et présentant seulement deux ouvertures en forme de fuseaux, a, a, d'un angle de 18° chacun, disposées symétriquement; la surface ouverte ainsi vaut les : $\frac{18° \times 2}{360°} = \frac{1}{10}$ de la surface sphérique totale. Le flux qui sort par ces fuseaux (le $\frac{1}{10}$ du flux total) est réfléchi par un miroir elliptique MM′ qui l'envoie sur un écran diffuseur E; on obtient ainsi, sur cet écran, une plage éclairée: $(a'a')$. Une *lampe étalonnée*, $\mathcal{L}'$ disposée de l'autre côté de l'écran (à droite), éclaire la plage b comprise à l'intérieur de la plage $(a'a')$; on s'arrange pour obtenir l'égalité d'éclairement. — Connaissant ainsi l'éclairement de la plage (b), par l'intensité horizontale de la lampe étalonnée et sa distance à l'écran E (Voy. § 6°, *Mesure de l'éclairement*), on en déduit le flux dû à $\mathcal{L}$, en fonction de l'*éclairement* de $(a'a')$ égal à celui de (b), et de sa *surface* (formules des § 66 à 68); en multipliant par 10, on aura le flux total sphérique de $\mathcal{L}$: F, et par suite l'intensité moyenne sphérique : $L_s = \frac{F}{4\pi}$.

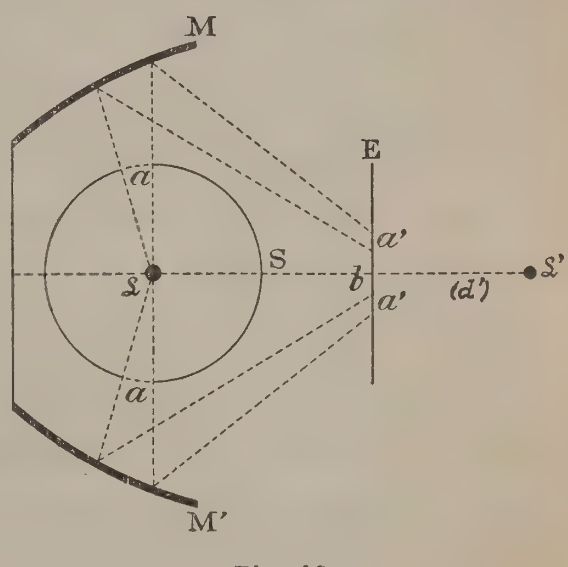


Fig. 49.

Avec la *même lampe de comparaison* $\mathcal{L}'$, placée à une distance convenable de E pour obtenir l'égalité d'éclat des plages avec une *autre lampe* $\mathcal{L}_1$ placée en $\mathcal{L}$, le lumenmètre demeurant à *distance fixe* de E (à gauche), de façon à obtenir la même plage $(a'a')$, le flux de cette autre lampe $\mathcal{L}_1$ sera au flux de la lampe $\mathcal{L}$ dans le même rapport que l'éclairement obtenu dans le 2e cas à l'éclairement obtenu dans le 1er cas : les flux seront proportionnels aux éclairements, et le lumenmètre sera étalonné pour d'autres mesures.

N. B. — Il est difficile de faire coïncider le filament d'une lampe avec le centre de la sphère; il faut donc choisir pour rayon de la sphère S, un nombre assez grand devant les dimen-

sions, en hauteur et largeur, de ce filament. D'ailleurs, il est bon de faire tourner la lampe sur elle-même, dans diverses positions au centre de S, et de prendre la moyenne des résultats obtenus. L'approximation obtenue avec ce lumenmètre, est voisine de 5 °/₀.

98. 2° **Lumenmètre d'Ulbricht**. — La sphère S est blanchie intérieurement à la céruse (pour donner une diffusion presque parfaite de la lumière) ; la lampe essayée est au centre en $\mathcal{L}$, une petite ouverture a en verre laiteux (fig. 50) laisse sortir les rayons réfléchis par la surface interne de la sphère, et ne laisse passer aucune radiation émise directement (un écran opaque K étant interposé entre $\mathcal{L}$ et a). Le flux F′ émis par la fenêtre a est *proportionnel* au flux total F de la lampe $\mathcal{L}$; on a : $F' = kF$. Une lampe étalonnée $\mathcal{L}'$ est installée à droite d'un écran C de photomètre Bunsen-Burel ; on établit l'égalité d'éclairement sur l'écran C ; on a déterminé à l'avance une série de valeurs de l'éclairement de la lampe $\mathcal{L}'$ à des distances d' variables de l'écran (voy. § 6°) on connaît donc l'éclairement dû à $\mathcal{L}'$; d'où l'éclairement en C dû à $\mathcal{L}$, et par suite le flux F′. Pour déterminer le coefficient k (qui permettra d'évaluer le flux cherché : $F = \frac{F'}{k}$), on dispose en $\mathcal{L}$ une lampe étalonnée dont on a déterminé au préalable le flux sphérique total (F_1) par la méthode graphique ; un essai au lumenmètre actuel donnera le flux (F'_1) sortant par a ; d'où : $k = \frac{F'_1}{F_1}$; le coefficient k étant connu, le lumenmètre est *étalonné* pour d'autres mesures. — Le diamètre le plus convenable, pour la sphère, doit être de 1 m. 50 au moins.

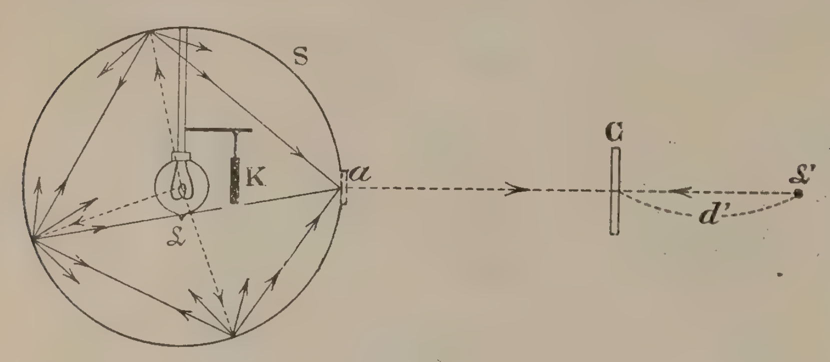


Fig. 50.

N. B. — La Compagnie des Lampes Mazda emploie un photomètre de ce type.

99. 3° **Lumenmètre physique**. — Cet appareil donne des *résultats indépendants* de la courbe de luminosité de l'œil de l'observateur qui opère, — laquelle, nous l'avons dit, diffère de celle d'un autre observateur. Voici le principe de la méthode :

On dispose, entre la lampe à essayer, et un couple thermo-électrique destiné, — nous l'avons dit au § 71, — à évaluer l'énergie de rayonnement par seconde de la source, la cuve en verre renfermant 1 c/m d'épaisseur de la solution indiquée (formule 33), et juxtaposée à une cuve renfermant une épaisseur de 2 c/m d'eau pure, — ceci, de façon à obtenir pour chaque radiation visible, une transparence proportionnelle à son coefficient de luminosité ; la courbe de luminosité est ainsi *matérialisée*, en quelque sorte. On a alors une mesure du flux lumineux en

watts, et directement; et ce nombre de watts mesure l'efficacité du faisceau lumineux qui produirait sur l'œil la sensation lumineuse ; ce nombre de watts est le même que celui que l'on aurait avec un flux lumineux égal à celui que l'on considère, et qui serait formé uniquement de la radiation de coefficient de luminosité maximum (rev. § 73, pour formules à appliquer.)

5° Distribution de la lamière autour de la lampe à incandescence. — Influence des réflecteurs et de l'ampoule

100.*a*) **Lampes au Carbone.** — La distribution du flux lumineux autour du filament de carbone (ampoule claire) est donnée par la courbe α de la fig.48; nous avons justifié cette distribution, par la forme en boucle du filament en question. Si l'on dispose un réflecteur R en métal émaillé blanc de forme parabolique, au niveau de la douille de la lampe, (le *foyer* lumineux étant placé *entre* le *fcyer* et le *sommet* du réflecteur, de façon à obtenir des rayons réfléchis divergents,) la distribution est modifiée ; les radiations $\widehat{ZOX}$ sont arrêtées, elles se réfléchissent sur la surface interne du réflecteur et s'ajoutent à celles de ngle $\widehat{XOY}$; les radiations sont donc plus nourries dans ce dernier angle, et la zone de distribution s'étend sous l'horizon (courbe α'). L'intensité maxima OK est alors à 40° environ au-dessous de OH; et l'intensité verticale nouvelle, OV_1, devient alors les $\frac{9}{10}$ de l'intensité maxima OK (alors que l'on avait, sur la courbe α : $OV' = \frac{OH}{5}$; et $OV = \frac{7}{10}$ OH seulement).

Le réflecteur est donc indiqué toutes les fois que l'on veut utiliser la lampe carbone à l'éclairage des *rues*, ou des *bureaux*, ou des *ateliers*.

b) **Lampes au tungstène** (*vide*). — Nous avons obtenu (fig. 45) la distribution du flux lumineux autour du filament en zigzags de ces lampes à *ampoule claire*.

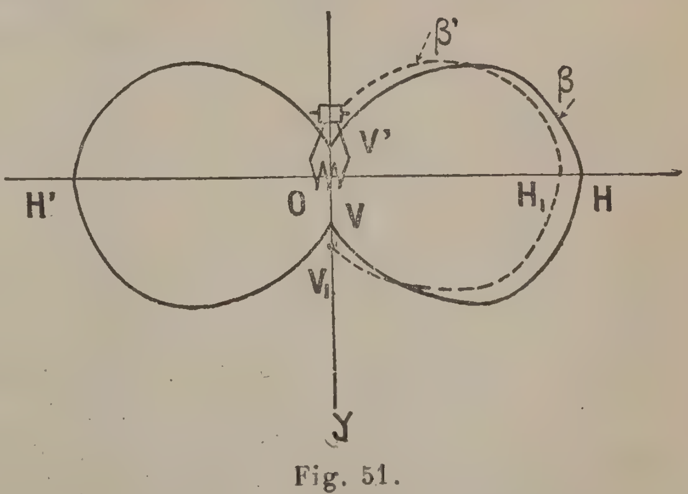


Fig. 51.

La fig. 51 reproduit cette distribution, — que nous avons utilisée, — selon la courbe β; l'intensité lumineuse est plus grande dans le sens horizontal qu'au-dessus et au-dessous de l'horizon ; les brins du filament constituant une sorte de manchon cylindrique éclairant qui rayonne principalement dans les directions perpendiculaires à l'axe.

L'intensité verticale OV' (plus faible à cause du culot qui arrête des radiations) vaut $\frac{L_h}{12}$ en moyenne; tandis que OV (opposée au culot) vaut $\frac{L_h}{6}$ (le double) : c'est que, de ce côté, la partie éclairante présente l'aspect d'une simple ligne polygonale éclairante (projection du filament sur un plan perpendiculaire à l'axe de la lampe.

La lampe au tungstène (vide) éclaire *moins bien* que celle au carbone (à intensité moyenne sphérique égale), sur les plans perpendiculaires à l'axe OY ; elle donne de meilleurs résultats quand on l'incline à 45°, elle *étale* mieux la lumière au-dessous. Un réflecteur améliore, comme dans le cas précédent, la distribution du flux lumineux vertical.

N. B. — Une ampoule *dépolie*, par la diffusion que produit la dégradation du verre, régularise davantage la distribution du flux, dans le sens vertical, et tout autour de la lampe (courbe en pointillés : β').

A cause de l'*absorption* par le verre dépoli, l'intensité horizontale maxima diminue (et aussi l'intensité moyenne sphérique, par conséquent) ; on a ainsi : (fig. 50 ; β') $OH_1 = 88$ à 90 % de OH.

c) Lampes au tunsgtène (*atmosphère gazeuse*) ; les fig. 46 et 47 nous ont donné la distribution du flux autour du filament, — et nous en avons donné l'explication au § 94.

Fig. 52.

La fig. 52 reproduit (courbe α), celle de la fig. 46 ; nous avons fait figurer, à côté (courbe β), la distribution de la lumière avec une lampe de 2.000 bougies, ou plus (1) ; le filament étant en zig-zags, dans ces lampes très intenses, la distribution rappelle celle de la lampe tungstène (vide), — fig, 51 ; courbe β — ; la lumière est plus régulièrement répartie autour du foyer, elle est moins bonne verticalement. Il en résulte que les *réflecteurs* ne modifieront pas de la même façon ces 2 courbes de distribution.

101. *d*) **Choix d'un réflecteur.** — Les réflecteurs métalliques ont un double but : concentrer le flux dans la direction désirée, et atténuer l'éblouissement du foyer lumineux en augmentant la surface éclairante ; mais

(1) Ceci, à une *échelle différente*.

ils absorbent une partie de la lumière qu'ils reçoivent, et leur *rendement* varie d'un type à un autre.

1° Le réflecteur en *métal poli* ou en verre étamé a un *rendement* supérieur à celui qui est recouvert d'un émail blanc (fig. 48), et celui-ci est lui-même d'un rendement supérieur aux réflecteurs à surface *mate*, mais ces derniers *diffusent* davantage la lumière.

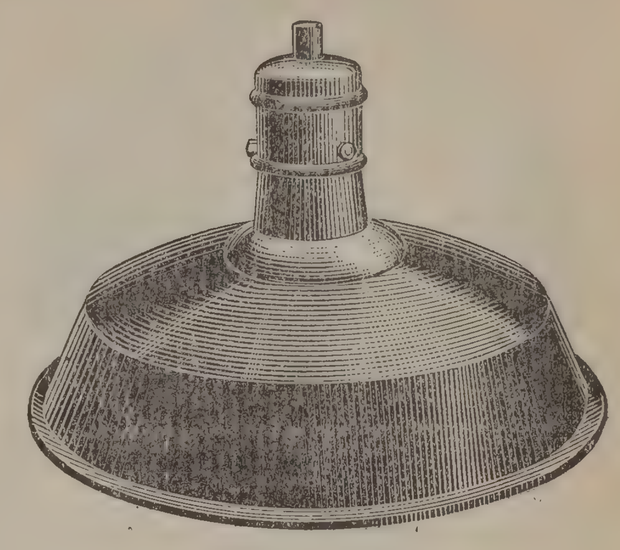


Fig. 53.

Le réflecteur Mazda, en tôle émaillée-blanc (dit *réflecto-lux-Mazda*) (fig. 53), modifie la distribution d'une lampe au tungstène comme l'indique la fig.54: la ligne qui joint le centre du filament au bord inférieur du réflecteur, fait un angle de 72°5 avec la verticale; c'est dans cet angle que se trouve distribué tout le flux lumineux de la lampe ; son pouvoir réflecteur varie de 60 à 65 %; il donne de bons

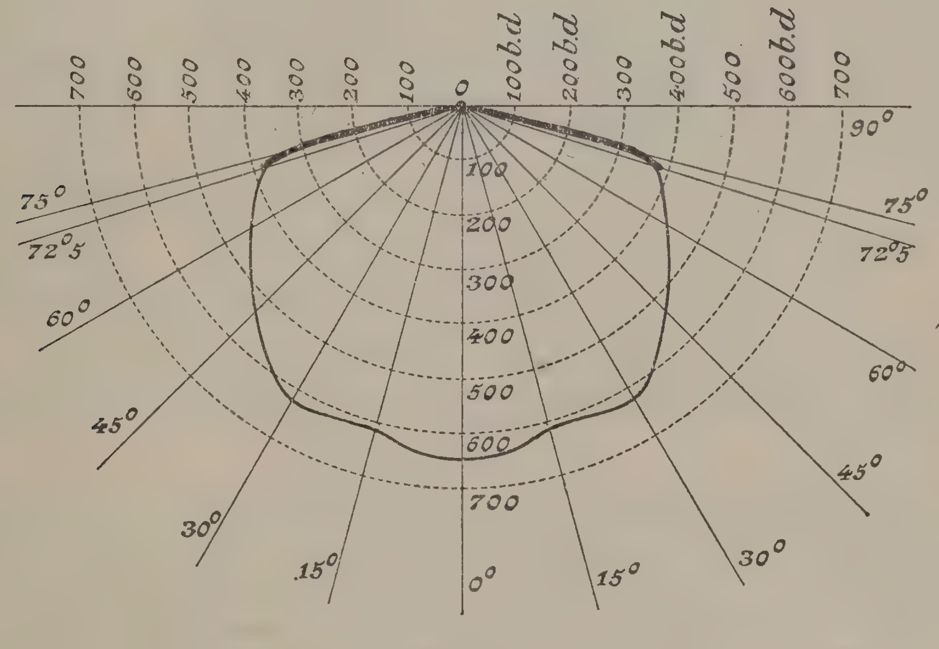


Fig. 54.

résultats avec les lampes (gaz) dont l'ampoule est *émaillée* (voy. *e*, influence de l'ampoule) dans sa moitié inférieure, opposée au réflecteur : celle-ci tamise la lumière, et ne produit pas d'*éblouissement*; le diamètre du réflecteur est de 36 c/m pour les lampes de 100 watts.

2° Les *réfracteurs holophanes* (de la Société française Holophane), se composent de 2 enveloppes en verre transparent (fig. 55), serrées l'une contre l'autre par une bague filetée en métal plastique, pour conserver *étanche* l'intervalle laissé entre elles; les parois intérieure et extérieure

du dôme ainsi réalisées, sont *lisses*, ce qui permet de les nettoyer facilement. Ces enveloppes portent des prismes horizontaux réfractants (sur les surfaces au contact) qui dirigent la plus grande partie de la lumière à 75° de la verticale (fig. 56).

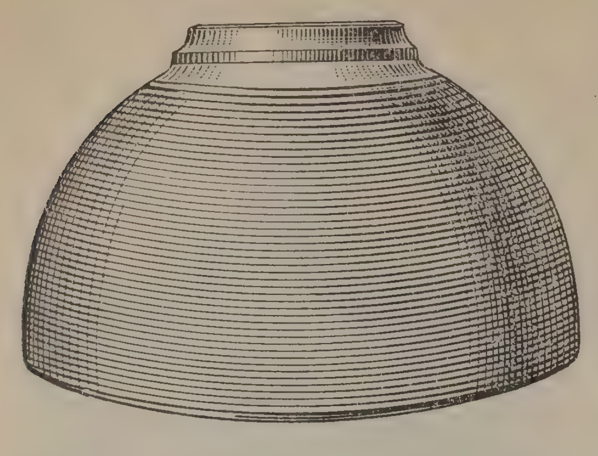


Fig. 55.

Ces réfracteurs, disposés autour d'une lampe à ampoule claire, présentent seulement une absorption de 10 à 12 %. On voit à la fig. 56, que le maximum de l'intensité lumineuse a lieu à 75° de la verticale; la nappe éclairante s'étale donc dans un cône très vaste, qui donne une répartition horizontale très égale (1).

Les *réfracteurs-globes* holophanes portent les prismes sur l'enveloppe intérieure seule et la lumière est distribuée dans un angle conique dont l'arête latérale fait de 70° à 80° avec la verticale : l'enveloppe extérieure, lisse sur ses 2 faces, diffuse simplement la lumière réfractée par l'enveloppe intérieure.

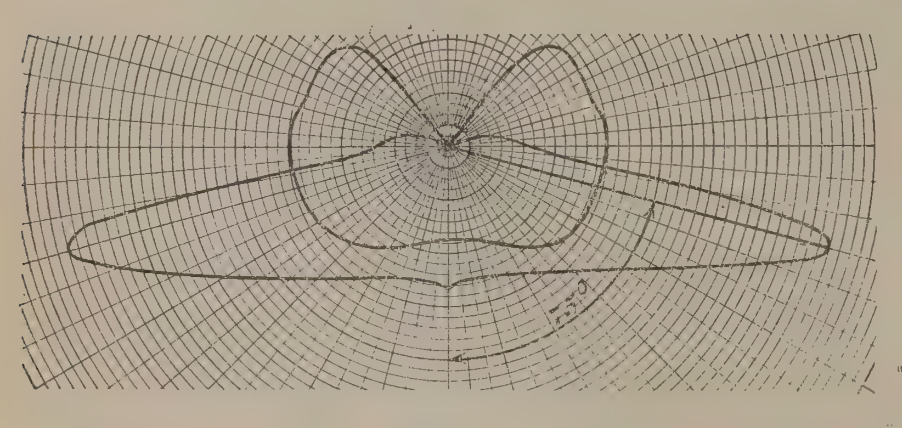


Fig. 56.

Ces appareils sont donc *supérieurs*, comme *rendement*, aux réflecteurs en tôle émaillée.

102. *e*). **Influence d'une ampoule opaline.** — Dans le but de supprimer l'*éblouissement* dû aux filaments des lampes au ungstène (en atmosphère gazeuse), — et qui cause une gêne, nuit à la vision, et fatigue l'œil, — quelques constructeurs ont songé à remplacer l'ampoule claire par une ampoule opaline, obtenue en mélangeant au verre destiné à la fabrication de l'ampoule des oxydes qui lui donnent une teinte blanche (lampe Philips, dites *Argenta*) ; d'autres ajoutent à l'ampoule claire un revêtement d'émail blanc à la surface externe (lampes Mazda, dites : *émail*). Nous avons essayé 2 lampes argenta (Philips), en atmosphère gazeuse (argon), de 50 et 100 bougies-heffner, et une autre en atmos-

(1) Diamètre de la zone d'éclairement uniforme = 8 fois la hauteur de la lampe au-dessus de la surface éclairée; on peut donc écarter les lampes de 8 fois cette hauteur.

phère d'azote, de 200 bougies-heffner; elles nous ont présenté, aux mesures de l'intensité lumineuse horizontale maxima, des rendements respectifs de : 78 % (50^{bh}), 8a % (100^{bh}), et 87 % (200^{bh}); on voit que l'ampoule opaline absorbe d'autant moins de radiations lumineuses que l'intensité est plus grande. La distribution du flux lumineux est sensiblement la même qu'avec ampoules claires.

Nous avons essayé, d'autre part, 2 lampes-émail (Mazda), l'une de 50^{bd}, l'autre de 125^{bd} ; leurs rendements respectifs (pour l'intensité lumineuse horizontale maxima) sont de : 85 % (50^{bd}) et 91 % (125^{bd}); la distribution du flux autour du filament n'est pas, non plus, sensiblement modifiée.

On voit que le rendement lumineux de l'ampoule-émail est supérieur à celui de l'ampoule argenta ; elle s'échauffe moins, d'autre part.

Un type de lampe-émail (50^{bd}) essayé avec un écran de papier coloré, a fourni les rendements suivants par rapport à une lampe à ampoule claire (50^{bd}), — toutes deux du type Mazda, et sous la tension de 120 volts aux bornes pour les deux lampes :

Couleur de l'écran	L_1 (lampe-claire)	L_2 (lampe-émail)	$\frac{L_2}{L_1}$
Vert	19 b.d.	14 b.d. 7	0,77
Jaune	26 b.d. 7	25 b.d. 4	0,95
Rouge	20 b.d. 2	18 b.d. 7	0,92
Sans écran	70 b.d.	59 b.d. 5	0,85

On voit que l'écran *jaune* donne le meilleur rendement ; dans le *jaune-vert*, où se trouve le coefficient de luminosité maximum, on obtiendrait un rendement voisin de 0,86 (c'est-à-dire à peu de choses près celui que donne la lampe-émail à *ampoule nue*.

N.B. — Nous avons dit, *antérieurement* (§ 100. *b*) qu'une *ampoule dépolie* donnait une intensité lumineuse réduite de 12 à 10 %, dans le plan horizontal (lampe tungstène-vide); le *rendement* est donc voisin de ceux obtenus avec ampoules opalines; mais la distribution de la lumière est un peu modifiée, plus régulière (il y a diffusion par la paroi de l'ampoule) ; seulement l'ampoule dépolie *s'encrasse* facilement dans une atmosphère poussiéreuse (ateliers, rues) ; il faut lui préférer l'ampoule opaline qui se nettoie facilement.

6° **Éclairement** (*mesure graphique, mesure expérimentale*)

103. — On mesure l'éclairement en un point, dû à une source, soit par une *méthode graphique*, soit avec un appareil étalonné (**luxmètre**).

a) **Méthode graphique.** — On utilise à cet effet la courbe de distribution de la lumière autour du filament de la lampe.

Soit un point B (fig. 57), d'un plan horizontal AX situé à la distance

h^m d'une lampe disposée en I ; joignons BI, et repérons l'angle α fait par le rayon lumineux IB (qui éclaire le point B) avec la verticale IA (axe de symétrie de la lampe) ; posons $AB = D^m$; $IB = d^m$.

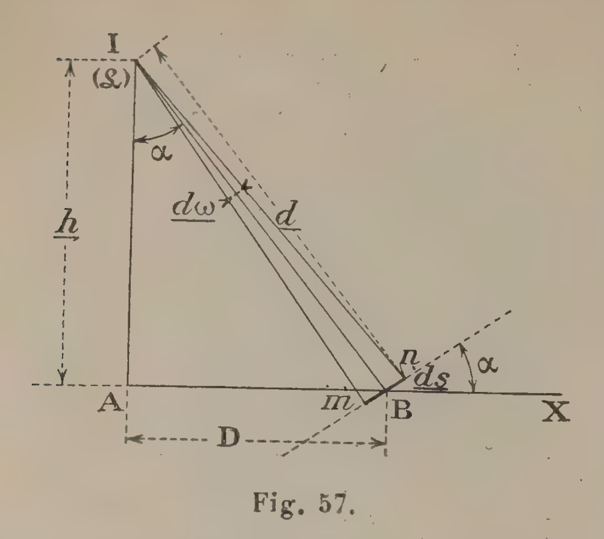


Fig. 57.

Sur une petite surface $mn = ds$, disposée en B, et normale au rayon IB, l'on recevra un flux élémentaire df, qui fournira un éclairement :

$E' = \frac{df}{ds}$. Mais (d'après le paragraphe 68, formule (31')), on peut écrire, si $d\omega$ est l'angle solide $\widehat{mIn}$:

$df = \mathcal{L} d\omega$; ($\mathcal{L}$ = intensité lumineuse dans la direction IB, mesurée sur la courbe de distribution du flux lumineux) ; d'où : $E' = \frac{\mathcal{L} d\omega}{ds}$.

Mais nous savons que : $d\omega = \frac{ds}{d^2} = \frac{ds}{\left(\frac{h}{\text{Cos}\alpha}\right)^2} = \frac{ds.\text{Cos}^2\alpha}{h^2}$; d'où enfin :

$E' = \frac{\mathcal{L}\text{Cos}^2\alpha}{h^2}$.

En amenant la petite surface mn sur le plan horizontal (elle tourne alors de l'angle α), elle recevra alors un éclairement : $E = E'\text{Cos}\alpha$; (c'est la formule 27).

D'où : (38)' $E = \frac{\mathcal{L}\text{Cos}^3\alpha}{h^2}$: nous nous servirons de cette formule dans *le problème de l'éclairage* (chap. II ; IIIe partie).

Pour introduire maintenant la distance horizontale D de la petite surface éclairée à la lampe, remarquons que nous avons : $D = h\,tg\alpha$; d'autre part, l'on sait que l'on a : $tg^2\alpha = \frac{1}{\text{Cos}^2\alpha} - 1$;

d'où : $D^2 = h^2\left(\frac{1}{\text{Cos}^2\alpha} - 1\right)$.

En éliminant $\text{Cos}\alpha$ entre cette équation et l'équation (38)', il vient, tous calculs faits : (38) $E = \frac{\mathcal{L}h}{(D^2 + h^2)^{3/2}}$.

104. **Application.** — Soit à déterminer l'éclairement d'un point situe *verticalement* à 3^m ($h = 3^m$), et horizontalement à 2^m ($D = 2^m$), d'une lampe électrique au tungstène (vide), de 25 *b.h.* sous 125 volts, essayée aux § (82. 1°, et 91. 1°) ; on a, en se reportant d'abord à la fig. 57 : $\text{tg}\,\alpha = \frac{D}{h} = \frac{2}{3}$; d'où (par calcul logarithmique) : $\alpha = 33°41'24''$; c'est l'angle du rayon IB avec la verticale.

Pour en déduire l'intensité lumineuse de la lampe en question, à l'aide de la courbe polaire de la fig. 45, évaluons cet angle *au-dessous de l'horizon*; il vaut : $90^\circ - 33^\circ 41' 24'' = 56^\circ 18' 36''$; il est compris entre 50° et 60°; en le construisant sur le diagramme, nous trouvons à l'échelle de la figure, $\mathcal{L} = 13$ b.d. (à moins de $\frac{3}{10^4}$ près). En exprimant $\mathcal{L}$ en bougies décimales, h et D en mètres, nous aurons l'éclairement en *lux* ; nous trouvons : $E = \frac{13 \times 3}{(2^2 + 3^2)^{3/2}} = \frac{39}{13^{3/2}}$.

Par logarithmes, nous obtenons : $13^{3/2} = 46{,}87$. D'où enfin :

$$E = \frac{39}{46{,}87} = 0 \text{ lux } 832.$$

N.B. — Cet exemple nous montre que la puissance de la lampe est *trop faible*, et qu'elle est placée *trop haut* pour fournir un bon éclairement.

Remarque. — Si l'on fait, dans la formule (38), D = 0, on obtient l'éclairement sur une surface normale aux rayons lumineux : $E_1 = \frac{\mathcal{L}h}{h^3} = \frac{\mathcal{L}}{h^2}$. qui n'est pas autre chose que la formule de l'éclairement telle qu'on l'applique dans le photomètre ; — dans l'exemple actuel, on aura pour l'éclairement en A : $E_v = \frac{3\text{b.d.}^2/_3}{9} = 0$ lux 41 ; il est plus de deux fois plus faible qu'à $56^\circ 18' 36''$.

Enfin, pour une surface placée à 3 m. de la lampe, mais *normalement* aux rayons lumineux *horizontaux*, il viendra :

$$E_h = \frac{22\text{b.d.}33}{9} = 2 \text{ lux } 48,$$

qui représentent un bon éclairement.

Nous reviendrons sur ces résultats dans le *projet d'éclairage* d'un local quelconque.

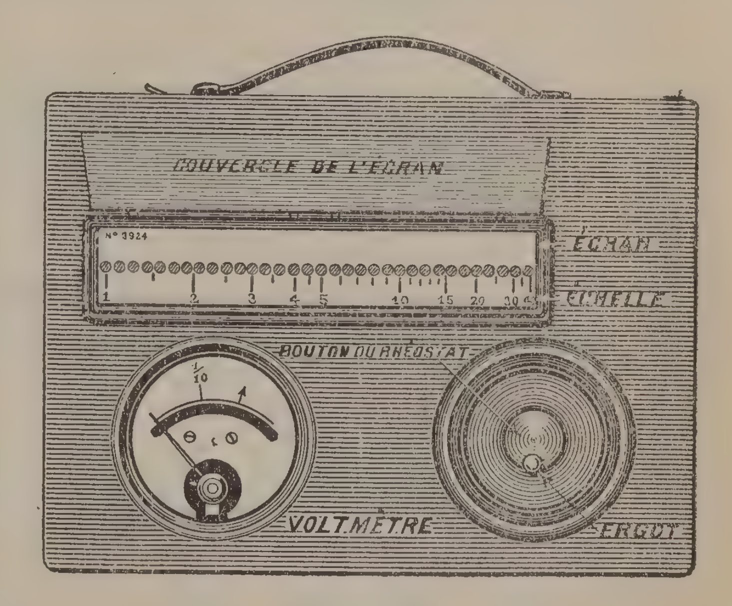


Fig. 58.

105. *b*) **Méthode expérimentale** (**luxmètre**). — Il permet d'obtenir, par une *lecture rapide*, l'éclairement en *lux* dû à une lampe quelconque, en un point quelconque.

Le luxmètre de la *Cie des Lampes* se compose essentiellement (fig. 58) d'un écran, constitué par une lame de verre clair recouverte intérieurement d'une feuille de papier *transparent*, et extérieurement d'une feuille de papier *opaque*, mais percée de trous circulaires.

L'écran forme couvercle supérieur d'une boîte métallique prismatique noircie intérieurement, et renfermant une *petite lampe* bien étalonnée (à incandescence), qui éclaire l'écran sur sa surface interne; la lampe étant disposée à une extrémité de la boîte (fig. 59), les trous sont à distances inégales de la lampe, donc inégalement éclairés : les uns

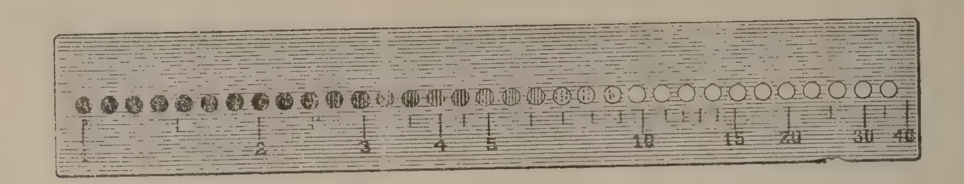


Fig. 59.

(les plus proches) sont brillants, les plus éloignés paraissent sombres leur éclat diminue graduellement à partir de la lampe. Le constructeur a indiqué, en face des trous, leur éclairement en lux par la lampe étalonnée (et qu'il a calculé connaissant les distances de celle-ci à chaque trou (formule 38).

Dans la boîte se trouvent : une batterie de piles sèches (pour l'alimentation de la lampe) un rhéostat réglable en série avec la lampe, et un voltmètre permettant de vérifier la tension normale de la lampe, celle pour laquelle son intensité lumineuse est connue et a servi à la graduation.

Pour évaluer, avec cet appareil, l'éclairement dû à une lampe d'appartement, en un point donné de la salle qu'elle éclaire, on dispose l'écran

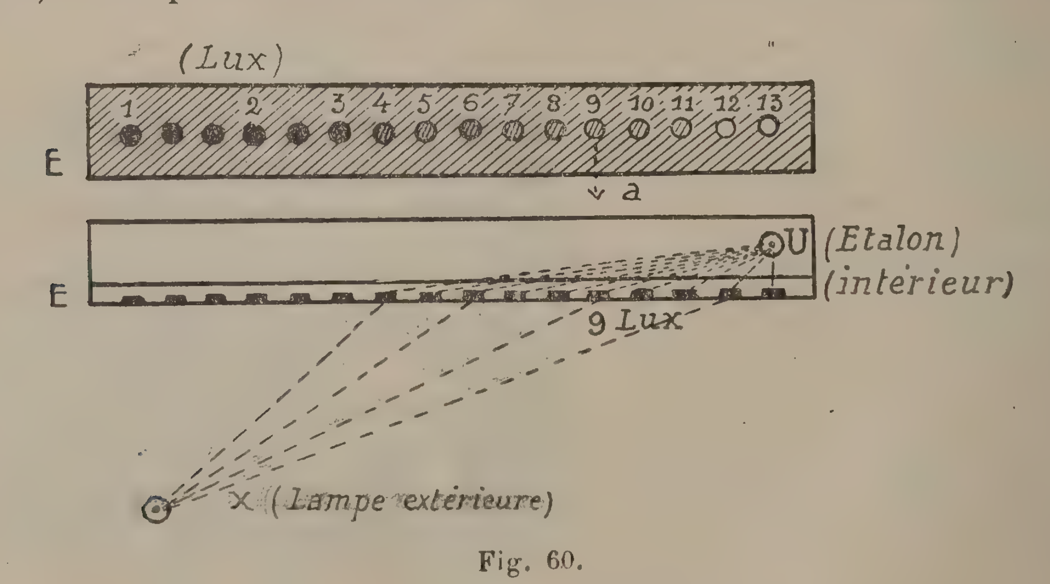


Fig. 60.

du luxmètre en ce point, et l'on cherche sur la série des trous, celui qui *se fond* avec l'écran : pour celui-là, il y a égalité d'éclairements dûs à la lampe de l'appareil, et à la lampe extérieure essayée : il suffit de lire le nombre indiqué en face du trou; — la fig. 60 montre la lampe extérieure en X; la lampe intérieure (étalon) en U; le trou également éclairé est marqué : 9 (en a); l'éclairement de la lampe X, au point considéré, est

donc égal à 9 lux. On peut, en déplaçant l'appareil, juger de l'éclairement d'une lampe en divers point d'une salle.

Cet appareil permet de faire 2 échelles de lecture, selon l'intensité de la lampe intérieure, c'est-à-dire selon la tension aux bornes de la lampe; à cet effet, le voltmètre porte 2 repères : $\frac{1}{10}$, et 1, auxquels l'aiguille est amenée en agissant sur le rhéostat; avec le repère $\frac{1}{10}$, (réducteur) les lectures valent 10 fois moins que celles marquées sur l'échelle de l'écran; c'est-à-dire qu'elles s'étendent de 0,1 lux à 4 lux ; avec le repère 1 l'échelle est utilisée telle quelle. Il existe un *luxmètre* plus puissant gradué de 15 à 500 avec 4 repères $\left(\frac{1}{100}, \frac{1}{10}, 1 \text{ et } 2\right)$ au voltmètre, et mesurant ainsi : de 0,15 à 1.000 *lux*.

N. B. — La précision des indications de cet appareil dépend évidemment du soin avec lequel il a été étalonné ; la lampe intérieure a besoin d'être *vérifiée* de temps en temps, par une mesure au photomètre Lummer et Brodhun. Quand on a terminé un essai, on ramène l'aiguille du voltmètre au zéro, à l'aide du rhéostat; la lampe étalonnée s'éteint.

IV° Constantes électro-optiques

Elles établissent : 1° la relation qui existe entre la tension E aux bornes d'une lampe, et l'intensité lumineuse L_h ; 2° la relation entre la puissance normale P_n absorbée par le filament, et l'intensité moyenne sphérique : L_s; soit : $w = \frac{P_n}{L_s}$, quotient auquel on donne le nom de *consommation spécifique* de la lampe.

106. *a*) **Relation entre L_h et E.** — L'expérience a montré que ces 2 grandeurs sont liées par une formule empirique qui s'exprime ainsi : (39) $L_h = AE^m$; on prend pour E des valeurs voisines de la tension normale E_n, et pour L_h des valeurs correspondantes obtenues au photomètre (§ 82 à 87).

N. B. — Les constantes A et *m* dépendent de la nature du filament ; et, pour un filament donné, de la puissance lumineuse de la lampe , mais le coefficient *m* caractérise *mieux* la *nature* du filament, comme nous le verrons : en général A croît, *m* diminue, quand L_s croît.

Une telle formule est d'un intérêt évident : elle permet d'obtenir les valeurs de L_h pour une valeur de E différente de la tension normale aux bornes : ce qui dispense de faire un trop grand nombre de *mesures directes* au photomètre, Chaque formule trouvée ne vaut, évidemment, que pour la lampe essayée.

Pour déterminer A et *m*, pour une lampe donnée, il faut 2 séries de valeurs de L_h et E; ce qui fournit 2 équations permettant d'obtenir ces

2 constantes ; il est bon de *vérifier* ensuite la formule trouvée, avec d'autres valeurs déterminées à l'avance de E et L_h, et de *modifier légèrement* les valeurs obtenues pour A et m dans un 1er calcul, de façon à ce que la formule définitive s'applique au plus grand nombre de cas, avec une approximation suffisante.

Développons, par logarithmes, la formule (39); il viendra :

(40) $\log L_h = \log A + m \log E$: c'est avec deux équations de cette forme que nous déterminerons A et m. Nous allons montrer *quelques applications* de ce calcul aux *lampes essayées* aux §§ 82 à 87.

Pour chaque type de lampe essayée, le calcul se ramène à la résolution des 2 équations (L_1 et L_2 étant 2 valeurs de l'intensité horizontale correspondant, respectivement, aux tensions E_1 et E_2 aux bornes) :

$$\log L_1 = \log A + m \log E_1$$
$$\log L_2 = \log A + m \log E_2.$$

D'où l'on tire (si $L_2 > L_1$) : (α) $m = \dfrac{\log L_2 - \log L_1}{\log E_2 - \log E_1}$;

et : (β) $\log A = \log L_1 - m \operatorname{Log} E_1$.

N.B. — On peut, avec une telle formule (39), calculer : $\dfrac{\Delta L_h}{\Delta E}$, c'est-à-dire la variation d'intensité lumineuse par rapport à la tension.

107. 1° **Lampe Faust au tunsgtène** (*vide*) ; *5 bougies sous 115 volts*. — En nous servant du tableau du § 83, nous avons fait le calcul avec : $L_1 = 7$ *b.d.* 2 ; $E_1 = 112$ v. ; et $L_2 = 8$ *b.d.* 4 ; $E_2 = 116$ v. 5 (valeurs de E_1 et E_2 qui comprennent : $E_n = 115$ v.) ; nous trouvons :

$$m = \frac{\log 8{,}4 - \log 7{,}2}{\log 116{,}5 - \log 112} = 3{,}91 \; ; \text{ et : } A = 6{,}99 \times 10^{-8};$$

d'où la *formule à essayer* : $L_h = 6{,}99 \times 10^{-8} \times E^{3,91}$.

Appliquée à $E = 105^v$ et à $E = 121^v$, elle ne donne *pas une approximation suffisante*. Nous avons cherché ensuite A et m, pour $E = 112^v$ et $E = 121^v$; puis, pour $E = 105^v$ et $E = 121^v$ (valeurs *extrêmes* de E dans nos mesures photométriques) ; en comparant les valeurs de m et A obtenues dans ces 2 derniers cas, soit respectivement : $m = 4{,}25$ et $A = 1{,}4 \times 10^{-8}$, et : $m = 3{,}96$ avec $A = 5{,}57 \times 10^{-8}$, et en prenant les *moyennes* de nos résultats, nous avons adopté, pour cette lampe de 5 ^{d} sous 115^v la formule :

$$(39') \qquad L_h = 4{,}6 \times 10^{-8} \times E^4.$$

Nous avons calculé, avec cette formule (39') les valeurs de L_h sous 105^v, 112^v, 116^v5 et 121^v ; le tableau ci-après indique les *résultats des calculs*, comparés à ceux des essais au photomètre, avec l'approximation fournie par le calcul :

E	L_h (formule)	L_h (photomètre)	Approximation
105^v	5,60	5,70	$< \frac{1,8}{100}$
112^v	7,24	7,20	$< \frac{0,6}{100}$
116^v5	8,46	8,40	$< \frac{0,7}{100}$
121^v	9,90	10	$\frac{1}{100}$

On voit que cette formule donne L_h avec une approximation comparable à celle que fournit la mesure photométrique. Cette lampe peut donc servir d'étalon, comme nous l'avons indiqué d'ailleurs.

2° **Lampe Faust au tungstène** (*vide*); 50 b.d. — 115 v.— En nous servant du tableau du § 84, nous avons obtenu : $L_h = 4,7 \times 10^{-6} \times E^{3,46}$, avec les valeurs de *L* aux tensions 106 v. et 121 v. ; en l'appliquant ensuite à E = 113 v., nous avons trouvé : L = 60 b.d. 5 (au lieu de 60 b.d. 7); donc une approximation de $\frac{0,33}{100}$.

Ajoutons que les *mesures* de L ont été faites avec la lampe 5 b. d.-115^v qui précède. *Inversement*, et pour contrôle, nous avons étalonné à nouveau la lampe de 5 b.d. 115^v avec celle de 50 b.d. 115^v; nous avons obtenu :

sous 112^v : L_h = 7 b. d. 24 (au lieu de 7 b. d. 20, obtenu *autrement*, avec la bougie-étalon de l'Etoile) :

sous 118^v : L_h = 9 b. d. 19 (au lieu de 9 b. d. que donne la mesure directe) : Ces résultats sont *remarquablement concordants*.

108. 3° **Lampe Philips au tungstène** (gaz); 50 b. h. sous 120^v 5. — Elle a été étalonnée avec la lampe au tungstène (*vide*) de 32 b. d. sous 110^v, qui elle-même a été étalonnée précédemment avec la lampe du § 107.

Nous avons obtenu : $L_h = 1,19 \times 10^{-7} \times E^{4,12}$ (en *bougies décimales*).

Nous avons dit que cette lampe avait ensuite servi d'étalon à toutes les lampes au tungstène en atmosphère gazeuse (*Faust* ou *Mazda*).

N. B. — Nous avons essayé une autre lampe Philips de 50 b. h. sous 120^v ; sa *caractéristique* de *fonctionnement électrique* se confond absolument avec celle de la précédente ; son intensité lumineuse horizontale maxima est absolument la même (à moins de 1 °/₀₀). Ces lampes, bien construites et bien vérifiées, peuvent servir d'étalons aux lampes à atmosphère gazeuse.

109. **Remarque importante.** — La variation ΔF de flux (en *lumens*) d'une lampe, est liée à la variation ΔE (*en volts*) de la *tension normale*

aux bornes, d'après une règle communiquée par *Engineering* (sept 1923; t. CXVI); on doit avoir, pour une lampe en *atmosphère gazeuse* : $\Delta F \leq 41\% F$; avec : $\Delta E \leq 10\% E$; soit encore : $\Delta F \leq 4{,}1\% F$; avec $\Delta E \leq 1\% E$; ou enfin : $\frac{\Delta F}{F} \leq \frac{4{,}1}{100}$; avec : $\frac{\Delta E}{E} \leq \frac{1}{100}$. Or : $F = 4\pi L_s$ $= 4\pi c L_h$ (c = coeff. réduct. sphérique); d'où : $\Delta F = 4\pi c\, \Delta L_h$; d'où : $\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta L_h}{L_h}$; donc, il faut avoir : $\frac{\Delta L_h}{L_h} \leq \frac{4{,}1}{100}$ avec $\frac{\Delta E}{E} \leq \frac{1}{100}$.

Faisons le calcul aux lampes du § 86, par exemple; nous aurons le tableau suivant :

Types	E_n	ΔE	$\frac{\Delta E}{E}$	L_h	ΔL_h	$\frac{\Delta L_h}{L_h}$	Variation de E	Variation de L_h
50[b] Faust	118[v]	2[v]5	2,12 %	50,4	3,8	7,53 %	de 118[v] à 120[v]5	de 50[b]4 à 54[b]2
50[b] Mazda	112[v]	2[v]5	2,23 %	52,5	5,3	10 %	de 112[v] à 114[v]5	de 52[b]5 à 57[b]8

d'où : pour $\frac{\Delta E}{E} = 1\%$, on a : *lampe Faust* : $\frac{\Delta L_h}{L_h} < 3{,}6\%$; et *lampe Mazda* : $\frac{\Delta L_h}{L_h} < 4{,}5\%$; la première *se rapproche* de la limite indiquée; la deuxième s'*en écarte peu*.

110. *b*) **Lampes-étalon.** — Nous venons de montrer comment les résultats fournis par les lampes à incandescence justifient leur emploi comme lampes-étalons. Il faut choisir des lampes n'ayant pas fonctionné *plus de 20 heures*, et moins de 200 h.

Nous avons montré, en 1919 (R. G. E; tome V; n° 19) que les résistances R_n et R_0 d'un filament de lampe dans l'argon (lampes Philips, de 25 à 50 b. h.) diminuaient au début de leur fonctionnement, selon une loi parabolique, et en fonction *du temps*; cette diminution est d'autant plus sensible que l'intensité lumineuse est *plus forte*, ou que la lampe a été plus survoltée au début; chaque résistance R_n ou R_0 passe par un *minimum* après un temps qui varie de 225 à 250[h]; la résistance R_n (ou R_0) croît ensuite linéairement; l'intensité lumineuse suit une *loi inverse*; le coefficient $\frac{R_n}{R_0}$ prend une valeur sensiblement constante pour chaque filament, dès la 300[e] heure. Ces observations montrent suffisamment dans quelles limites de durée de la lampe, celle-ci conserve son étalonnage. A la 500[e] heure, le filament se retrouve à peu près au même état physique qu'au début.

111. *c*) **Consommation spécifique.** — 1° Nous avons dit que la consommation spécifique w d'un filament de lampe est définie par le rapport (41) : $w = \frac{P_n}{L_s}$; quelques constructeurs rapportent, au contraire, la consommation spécifique au quotient : $\frac{P_n}{L_h}$; la formule (41) est la plus rationnelle, puisque L_s se déduit du *flux lumineux*, qui constitue, nous l'avons dit, la caractéristique la plus certaine d'une lampe. Mais, dans la pratique, comme on évalue L_h dans les mesures photométriques, il est commode de calculer directement : $w' = \frac{P_n}{L_h}$; nous allons voir que l'on peut ensuite passer à w, par une relation simple.

Soit c le coefficient de réduction sphérique $\frac{L_s}{L_h}$ d'une lampe (§ 93) ; nous écrirons, identiquement :

$$w = \frac{P_n}{L_s} = \frac{P_n}{cL_h} = \frac{w'}{c}\cdot$$ D'où les valeurs de w en fonction de w' :

Pour les lampes au *carbone*, $c = 0{,}80$; d'où : $w = \frac{w'}{0{,}80} = 1{,}25\, w'$;

(42)

Pour les lampes tungstène (vide), $c = 0{,}78$; d'où : $w = \frac{w'}{0{,}78} = 1{,}28\, w'$;

Pour les lampes tungstène (gaz), $c = 0{,}98$ (25 à 400 b.) ; d'où : $w = \frac{w'}{0{,}98} = 1{,}02\, w'$;

Pour les lampes tungstène (gaz), $c = 1{,}04$ (600 à 1.000 b.) ; d'où : $w = \frac{w'}{1{,}04} = 0{,}96\, w'$;

Pour les lampes tungstène (gaz), $c = 0{,}78$ (2.000 b. et plus) ; d'où : $w = \frac{w'}{0{,}78} = 1{,}28\, w'$.

Les formules (42) ont été appliquées par nous aux types de lampes étudiés précédemment ; nous indiquerons les valeurs obtenues dans un tableau ultérieur, en face des autres caractéristiques de chaque lampe.

2° Lorsqu'on examine *une série de lampes* de même fabrication, on remarque que : (α) la *consommation spécifique diminue* légèrement quand l'intensité lumineuse croît assez peu au-delà de sa valeur normale, c'est-à-dire pour une légère surtension ; ce qui prouve que L_h (ou L_s) croît un peu plus vite que P_n ; la quantité w *croît au contraire* pour une surtension plus forte ; il faut éviter les surtensions au-delà de 10 % de la valeur de E_n ; dans la pratique, on ne dépasse pas 5 à 6 %, pour maintenir le filament dans un bon état de conservation.

β) pour des lampes de *même nature* (tungstène dans le vide; ou tungstène dans un gaz inerte) et de *même fabrication*, la quantité w *diminue* quand la puissance lumineuse des lampes croît; ainsi, l'on obtient :

Pour les lampes au carbone graphité (vide), de 32 b.d. sous 110 v., w vaut 2 watts 32 ;
Pour les lampes au tungstène (vide), de 5 b.d. à 50 b.d., w varie de 1 watt 79 à 1 watt 12 ;
Pour les lampes au tungstène (gaz), de 25 b.d. à 125 b.d., w varie de 0 watt 94 à 0 watt 81 ;
Pour les lampes au tungstène (gaz), de 100 b.d. à 1.000 b.d., w varie de 0 watt 81 à 0 watt 51 ;

après l'intensité de 1.000 b.d., w demeure *sensiblement constant*, sa diminution étant à peine appréciable. Nous donnerons, plus loin, les valeurs de w pour les séries de lampes étudiées. Dans les lampes à *ampoule opaline*, la consommation spécifique est en moyenne (1,15) fois plus grande que dans les lampes à ampoule claire (toutes choses égales).

112. 3° **Variation de w; courbe.** — Si l'on porte sur un système d'axes de coordonnées et à une échelle convenue, en *abscisses* : les intensités moyennes sphériques, en ordonnées les valeurs de w correspondantes, on obtient une courbe telle que α ou β (fig. 61), pour les lampes claires Philips, de 50 à 1000 b. indiquées (*Heffner*); les nombres qui ont servi à construire cette courbe sont indiqués *au tableau* du § 117. 5°.

D'après l'*allure* de la courbe, nous avons essayé de traduire une relation entre w et L_s par une formule hyperbolique de la forme : $w = a + \frac{b}{L_s}$; l'essai de cette formule nous a incité à adopter un *terme correctif*; l'expression définitive est de la forme :

(43) $w = a + \frac{b}{L_s} + \frac{b'}{L_s^2}$, qui a l'avantage de s'appliquer à toutes les formes de filaments (de 25 à 1.000 bougies) et qui montre comment w dépend uniquement de L_s, pour une nature de filament donnée.

α) *Lampes claires.* — La formule trouvée avec 3 valeurs de L_s quelconques, est :

(43') $w = 0{,}42 + \frac{38}{L_s} - \frac{910}{L_s^2}$ (L_s étant en *bougies-heffners*). Les nombres trouvés avec cette formule diffèrent de ceux que donne le calcul direct de $\frac{P_n}{L_s}$, de 2 % *en moyenne* (du même ordre de grandeur que l'approximation obtenue dans le calcul de $\frac{P_n}{L_s}$); la formule ne

s'applique qu'à partir de 50 b.; au-delà de 1000 bougies, elle ne s'applique plus, le filament ayant une *forme différente*.

N. B. — L'*asymptote* horizontale à la courbe α, est l'ordonnée : $w = 0{,}42$ (*consommation spécifique limite*).

Traduite en *bougies décimales*, la formule (43) s'écrit ainsi :

(43″) $$w = 0{,}47 + \frac{42{,}4}{L_s} - \frac{1016}{L_s^2}.$$

β) *Lampes argenta*. — La formule qui traduit les variations de w en fonction de L_s (courbe β) est celle-ci (L_s en bougies-heffners) :

(44) $w = 0{,}62 + \frac{9{,}8}{L_s} + \frac{117}{L_s^2}$; en traduisant L_s en bougies décimales, on obtient :

(44′) $$w = 0{,}69 + \frac{10{,}9}{L_s} + \frac{130{,}7}{L_s^2}.$$

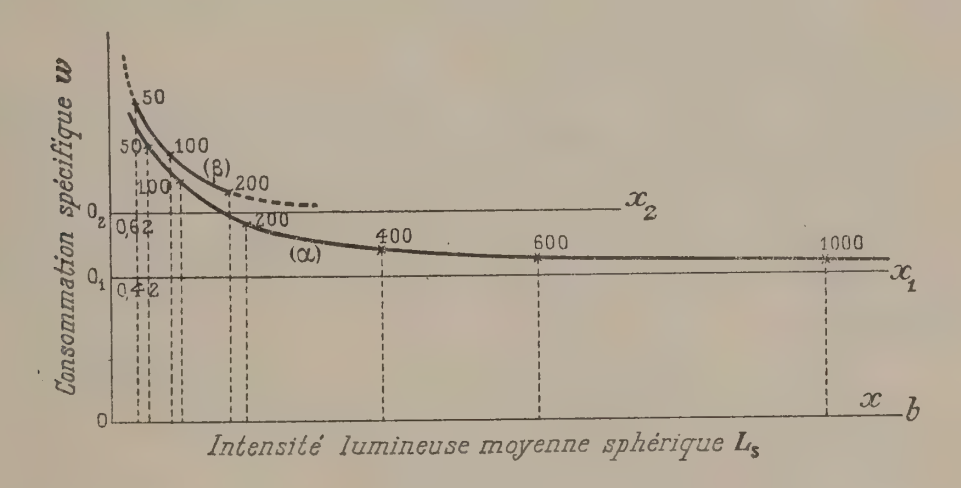


Fig. 61.

N. B. — Pour les lampes d'une *autre marque* (Faust, Mazda, etc.), les coefficients numériques peuvent *varier légèrement*, selon la *pureté du filament*, ou ses *qualités mécaniques* fournies par l'étirage.

V° Constantes de durée

113. — La *durée* d'une lampe dépend : 1° de l'usure normale du filament (par *électrovaporisation*) ; 2° de l'usure anormale, par *surtension* aux bornes, qui accélère l'électrovaporisation.

a) *Filament-carbone*. — La durée *utile*, — c'est-à-dire celle pour laquelle la perte d'*intensité lumineuse* ne descend pas au-dessous de 15 à 20 % (au maximum), est de 600 heures (carbone ordinaire) et 800 heures (carbone graphité) : ceci, sous *tension constante* aux bornes. Avec surtension voisine de 5 % $\left(\frac{\Delta E}{E} \gtreqless 5\ \%\right)$, L_s croît, et w diminue; mais la durée de la lampe en est réduite. Quand une lampe vieillit (l'ampoule

se noircit par le dépôt des particules de charbon), L_s diminue, ainsi que $\frac{\Delta L_s}{\Delta E}$; mais w croît, car L_s diminue plus vite que P_n; la consommation spécifique d'un filament de carbone ordinaire, après 500 heures, monte de 3 watts 5 à 4 watts; pour le carbone graphité elle passe de 2 watts 3 à 2 watts 6.

b) Filament-tungstène (vide). — La durée normale (sous tension normale) est de 1200 à 1500 h., avec surtension $< 5\%$, elle dure facilement 1200 heures; avec une surtension de 10%, elle tombe à 800 ou 1000 heures. Le noircissement de l'ampoule est *plus lent* qu'avec le carbone (la masse atomique du tungstène est très élevée).

Au bout de 1500 h. de durée, la consommation spécifique s'élève un peu (elle est 1,15 fois plus forte seulement); le *dépolissage* de l'ampoule accélère le noircissement : le verre dépoli étant plus absorbant que le verre clair, laisse passer moins d'énergie lumineuse ; la lampe est ainsi plus chaude, l'électrovaporisation est plus active ; la durée de la lampe est réduite d'un *tiers* environ.

c) Filament-tungstène (gaz). — Le coefficient w reste sensiblement constant pendant les 500 premières heures (à tension constante); il s'accroît très peu jusqu'à la 1000e heure. En général, il s'accroît d'autant plus qu'il était plus grand dans la lampe neuve. L'électrovaporisation est retardée par la présence du gaz inerte, comme nous l'avons expliqué antérieurement.

VI° Emploi du courant alternatif

114.— L'emploi d'une lampe donnée, en courant alternatif, donne lieu à des remarques importantes, que l'on peut résumer de la façon suivante ; — disons tout de suite que le filament des lampes à incandescence *ne présente pas* de *self-induction*.

a) Carbone. — 1° On détermine L_h *maximum*, à cause du papillotage spécial auquel donne lieu la *fréquence* du courant; sa valeur diffère peu de celle qui a été obtenue en courant continu ; pour obtenir une même intensité lumineuse L_h qu'en courant continu, il faut une *tension plus élevée* aux bornes (1,05 à 1,10 fois plus grande).

2° La *consommation spécifique* w est plus grande qu'en courant continu (1,4 fois plus forte, en moyenne, à tension constante);

3° La *caractéristique* (relevée avec un ampèremètre et un voltmètre thermiques) est légèrement *relevée* par rapport à celle obtenue sur courant alternatif; dès lors R_n est un peu plus grand (de 1 % en général, seulement, en opérant dans les mêmes conditions, de façon à ce que les erreurs possibles de lecture soient de *même sens*).

Le filament rougit *plus tôt* (c'est-à-dire à une *plus faible tension*) qu'en courant continu ; il résulte de ce qui précède que le coefficient $\frac{R_n}{R_o}$ est un peu plus grand aussi.

4° Le *coefficient* de *réduction sphérique* est augmenté de 0,01 à 0,02 (sur le nombre 0,80).

5° La *fréquence* des courants a une influence très marquée sur les variations de L_h ; une lampe de 5 bougies donne une variation $\frac{\Delta L_h}{L_h}$ de 64 % à la fréquence 30; cette variation *diminue* quand la fréquence *croît*; on n'a plus que 27 % à la fréquence 60 (J. T. Morris) ; selon Sharp, les variations en question ont seulement de 53 % (fréquence 25), et 32 % (fréquence 50). Ces variations s'atténuent quand l'intensité lumineuse est *plus grande*.

Une lampe de 32 bougies fournit, pour $\frac{\Delta L_h}{L_h}$: 15 % (fréquence 25) ; et 9 % (fréquence 50). En résumé, la variation en question *croît*, dans toutes les lampes, jusqu'à la fréquence 30 : elle *diminue* ensuite jusqu'à la fréquence 50. M. A. Blondel a proposé la fréquence 33, qui semble répondre à un meilleur fonctionnement sur courants alternatifs.

N. B. — A cause des vibrations du filament sous l'influence de la fréquence, il est nécessaire de maintenir celui-ci par un *crochet*, pour éviter la *rupture*.

b) *Tungstène* (*vide*). — Le filament de tungstène se tient aussi bien sur courant alternatif que sur courant continu, à la fréquence voisine de 33 ; — on peut ainsi faire durer exceptionnellement une lampe 3000 heures, avec une surtension de 10 % au maximum. La *consommation spécifique* est un peu plus grande (1,1 à 1,2 fois plus grande) qu'en courant continu.

La caractéristique relevée avec courant alternatif, est *un peu relevée* sur celle que donne le courant continu. Il n'y a pas craindre de *rupture* du filament par les vibrations dues à la fréquence, étant donné sa fixation sur *crochets*.

c) *Tungstène-gaz*. — La présence d'un gaz inerte a pour effet de rendre moins sensibles les écarts que présente un filament de lampe sur courants alternatifs et sur courant continu ; la caractéristique est un peu relevée ; les valeurs de R, évaluées sous diverses valeurs de E, sont de 4 ‰ seulement supérieures ; le coefficient *m* de la formule (39) est un peu plus faible qu'en courant continu.

La *consommation spécifique* n'est que 1,05 fois plus grande qu'en courant continu ; la variation $\frac{\Delta L^h}{\Delta E}$ est *plus faible* aussi ; il n'y a *pas de vacillement* dans l'éclat lumineux.

La distribution du flux lumineux est *plus régulière* qu'avec le courant continu, L_h est un peu plus faible (pour une même lampe) et L_v un peu plus grande ; le coefficient de réduction est un peu plus grand aussi.

d) Lampe Nernst. — La lampe intensive Nernst (type A) se fabrique pour courants alternatifs (entre 195 et 260 volts seulement, car l'électro-aimant peut très bien fonctionner dans ces conditions, mais avec un noyau de fer très doux et bien recuit, donc sans *hystérésis*). Les variations d'intensité lumineuse dépendent aussi de la fréquence : 12 % à la fréquence 25; 15 % à la fréquence 30; elles sont *nulles* à la fréquence 50 ; mais la consommation spécifique : $\left(w = \frac{P_n}{L_s}\right)$ est 2 *fois plus grande* qu'en courant continu; on ne les construit que pour des tensions de 200 à 260 volts.

e) Type de lampes (Caractéristiques générales)

115. — Nous allons donner ci-après, les caractéristiques générales de quelques types de lampes actuellement en usage, et nous les comparerons au point de vue de leur emploi à l'éclairage. Les intensités lumineuses sont *toutes indiquées* en *bougies décimales*, les *flux* en *lumens*, les puissances et consommations spécifiques en *watts*, les tensions électriques en *volts*.

a) Lampes-carbone. — On ne fait plus actuellement que des lampes à filament graphité. Voici les caractéristiques de quelques lampes essayées par nous (avant 1914) :

ORIGINE	E_n	L_h	$L_h = AE^m$	L_s	$\frac{R_n}{R_o}$	F	w
Cie générale d'Electricité (Paris) (C.G.E)	130	16	$2,78 \times 10^{-9} \times E^{4,59}$	13	0,65	163,4	2w43
Sté générale d'Electricité (Berlin) (A.E.G.)	130	16	$3,36 \times 10^{-12} \times E^{5,97}$	13	0,60	163,4	2w97

La 1re lampe est française; la 2e allemande; on voit que la consommation spécifique est *plus faible* dans la 1re, qui est certainement *mieux graphitée*.

La lampe suivante que nous avons essayée récemment (février-mars 1924) montre les progrès réalisés au point de vue de la graphitisation du filament; la consommation spécifique est beaucoup plus faible qu'avant 1914; il s'agit du *type Faust, indiquée* (32 b. sous 110 volts), avec *filament Planchon* :

E_n	L_h	c	L_s	P_n	w	$\frac{R_n}{R_0}$	$L_h = A \times E^m$	F
110v	40,4	0,80	32,33	75,35	2,33	0,52	$7{,}38 \times 10^{-12} \times E^{6{,}24}$	406,4

N. B. — L'indication du *culot* portant 32 bougies, l'on voit qu'il s'agit bien de l'intensité moyenne sphérique.

Remarque. — Si l'on compare le coefficient m de cette lampe à celui de la lampe de l'A. E. G., on constate qu'ils ont sensiblement la même valeur; d'ailleurs, comme l'a montré le Laboratoire Central d'Electricité, cette valeur de m oscille autour de 6, pour le carbone graphité. Le coefficient A caractérise plutôt l'intensité lumineuse; c'est-à-dire que, d'une lampe de L bougies, à une autre lampe de L_1 bougies ($L_1 \gtreqless L$), mais toutes deux construites avec un filament de même nature, m demeurera sensiblement constant; A seule varie avec l'intensité lumineuse.

Cette remarque s'applique d'ailleurs aux lampes à filament de tungstène, comme nous allons le voir.

116. *b*) **Lampes au tungstène** (*vide*). — 1° **Lampes anciennes** (*filament filé*). — Nous avons essayé, avant 1914, des lampes *à filament filé* (par pression) du tungstène pulvérulent ou colloïdal aggloméré par du goudron, de la gomme, et carbonisé à l'abri de l'air; on obtenait encore des filaments en mélangeant l'oxyde TuO^3 à un liant de carbone; le mélange incandescent était porté dans l'hydrogène pour réduire l'oxyde, on avait alors une masse que l'on filait à la presse, et qui *durcissait à l'air*.

Nous donnons ci-après les caractéristiques de quelques-unes de ces lampes, — comparables comme fonctionnement aux lampes actuelles à filament étiré, mais plus fragiles car le filament était moins compact, et se brisait plus aisément; le rapport $\frac{R_n}{R_0}$ est nécessairement différent.

Origine	E_n	L_h	c	L_s	P_n	w	$\frac{R_n}{R_0}$	$L_h = AE^m$	F
Cie Osram (allemande) (Sté Richard Heller	130	18	0,78	14	20,80	1,49	16,00	$4{,}22 \times 10^{-8} \times E^{4{,}15}$	176
Cie générale d'Electricité (C.G.E.); Paris	125	14	id.	11	16,25	1,48	15,50	$6{,}33 \times 10^{-8} \times E^{3{,}97}$	138,3
	125	23	id.	18	25,31	1,40	14,20	$1{,}68 \times 10^{-7} \times E^{3{,}88}$	226,1
Sté Fabius Henrion lampe osmine (Nancy)	130	25	id.	19 1/2	27,30	1,40	16,00	$3{,}20 \times 10^{-7} \times E^{3{,}74}$	245,1
Sté Lacarrière (lampe Z; Paris)	130	25	id.	19 1/2	25,68	1,32	12,80	$2{,}28 \times 10^{-6} \times E^{3{,}33}$	245,1

N. B. — On voit bien, en inspectant ce tableau, que A croit, en général avec L_s, tandis que m diminue. Nous verrons que ces coefficients se retrouvent assez bien, avec des valeurs très voisines de celles-ci, dans les lampes actuelles à *tungstène étiré* : ce qui indique nettement que m caractérise la *nature* du filament ; tandis que $\frac{R_n}{R_o}$ caractérise l'*état physique* du filament ; ainsi les valeurs de ce coefficient dans les lampes anciennes sont beaucoup plus élevées qu'avec les lampes actuelles à filament dans le vide ; seule la *lampe Z* (Société Lacarrière) donne une valeur comparable à celle que l'on obtient actuellement ; ce qui semble indiquer qu'elle était déjà fabriquée avec un filament étiré ; la richesse de sa lumière en radiations sélectives en était un autre indice.

2° Lampes actuelles (*filament étiré*). — Nous donnons, ci-après, les caractéristiques des *lampes-Faust* (Compagnie lorraine des lampes ; Anciens Etablissements F. Henrion), que nous avons essayées récemment (février à mai 1924), et qui nous ont été offertes gracieusement par cette Compagnie, pour études.

Nous n'avons pas été à même d'essayer d'autres types de lampes à filament dans le vide. Ces lampes sont désignées, couramment, sous la rubrique de : *lampes monowatt* ; parce que w prend une valeur qui s'approche de l'unité (1 watt), mais pour les puissances lumineuses les plus élevées.

	Type	E_n	L_h	c	L_s	P_n	w	$\frac{R_n}{R_o}$	$L_h = AE^m$	F
LAMPES FAUST	* 5 bougies	115	8	0,78	6 1/4	11,2	1,79	11,8	$4,6 \times 10^{-8} \times E^{4}$	78,6
	10 —	110	14,2	id.	11	14	1,27	11,7	$6,05 \times 10^{-8} \times E^{4,10}$	138,3
	16 —	106	22,4	id.	17,4	21,9	1,26	11,8	$1,40 \times 10^{-7} \times E^{4,05}$	218,7
	25 —	110	33	id.	25,7	30,5	1,19	11,8	$2,25 \times 10^{-6} \times E^{3,51}$	323
	*32 —	110	44 2/3	id.	34,8	39,2	1,13	12,6	$7,11 \times 10^{-7} \times E^{3,82}$	437,4
	*50 —	115	64,3	id.	50,1	56,2	1,12	12,6	$4,7 \times 10^{-6} \times E^{3,46}$	629,75

N. B. — Les lampes précédées du signe * ont été *étalonnées*, comme nous l'avons dit antérieurement, pour servir aux mesures photométriques d'autres lampes de la même série.

A NOTER : (α) la *décroissance* de m, et la croissance de A, avec l'accroissement de la puissance lumineuse ; (β) les valeurs de $\frac{R_n}{R_o}$, remarquablement voisines de 11,8 (de 5 à 25 bougies), et de 12,6 (de 32 à 50 bougies) ; (γ) la *diminution* de la consommation spécifique w, avec les lampes à filament étiré nouvelles ; (δ) les valeurs très comparables de m, et de A, entre ces lampes, et les anciennes, pour les types de puissances lumineuses voisines.

117. *c*). **Lampes au tungstène** (*atmosphère gazeuse*). — Nous avons essayé quelques *lampes Faust* (de la même Compagnie lorraine des lampes), quelques lampes *Mazda* (de la Compagnie générale des Lampes), lesquelles nous ont été également offertes gracieusement pour nos essais — ainsi que des *lampes Philips*, qui nous ont été envoyées

par la *Société Philips*, également à titre gracieux. Voici, dans les tableaux ci-après, les caractéristiques de ces lampes, qui nous permettront de les comparer.

1° Lampes Faust

Type	E_n	L_h	c	L_s	P_n	w	$\frac{R_n}{R_o}$	$L_h = AE^m$	F
25 bougies	110	27,6		27	25.5	0,94	15,3	$4.54 \times 10^{-7} \times E^{3,81}$	339,4
32 —	115	36,8		36	32,2	0,89	15.5	$2,68 \times 10^{-8} \times E^{4,43}$	452,5
50 —	118	50,4	0,98	49	43,1	0,88	15.9	$5,61 \times 10^{-7} \times E^{3,84}$	615,9
100 —	$118\frac{1}{2}$	78,4		76.8	63,7	0,83	15.2	$0,94 \times 10^{-6} \times E^{3,82}$	965,4
100 watts	119	125,8		123,3	101,1	0,82	15,7	$1,92 \times 10^{-6} \times E^{3,77}$	1.549,9

N. B. — On peut remarquer, ici encore, que m diminue, et A augmente en général quand la puissance lumineuse croît, mais *principalement à partir de 50 bougies.*

Le coefficient $\frac{R_n}{R_o}$ est plus grand qu'avec les lampes à vide (la température est *plus élevée* ; nous avons expliqué la raison de cet accroissement, antérieurement).

La consommation spécifique est *plus faible* qu'avec le filament dans le vide, elle décroît quand la puissance lumineuse des lampes croît.

2° Lampes Mazda

Type	E_n	L_h	c	L_s	P_n	w	$\frac{R_n}{R_o}$	$L_h = AE^m$	F
50 bougies	112	52.5	0,98	51.5	45,5	0,88	15,20	$4,98 \times 10^{-7} \times E^{3,91}$	647,4
100 watts	115	129,5		126,9	103,5	0,81	15,80	$0,28 \times 10^{-6} \times E^{4,20}$	1.595,3

N. B.— Ces lampes sont absolument comparables à celles du tableau précédent (au point de vue de w) ; le coefficient m de la lampe 100 watts est un peu plus grand, mais le coefficient A un peu plus faible. Les valeurs de $\frac{R_n}{R_o}$, très comparables, croissent avec la puissance lumineuse.

3° Lampes Mazda (*émail*)

Type	E_n	L_h	c	L_s	P_n	w	$\frac{R_n}{R_o}$	$L_h = AE^m$	F
50 bougies	115	47	0,98	46	47,7	1,04	16.2	$0,29 \times 10^{-9} \times E^{5,44}$	578,2
100 —	115	97		95	75,35	0,79	16,3	$1,91 \times 10^{-5} \times E^{3,28}$	1.194,1

Le filament étant *plus chaud* que dans les lampes claires, le coefficient $\frac{R_n}{R_o}$ prend une valeur un peu plus grande ; à cause de l'*absorption* de radiations par l'ampoule, le rendement lumineux est plus faible, et w plus grand (sauf pour la lampe 100 bougies qui présente une *anomalie*). Les coefficients A et m sont différents de ceux des lampes à ampoule claire.

4° *Lampe Mazda* (*Soleil*). — Cette lampe, à ampoule bleue (verre coloré par une *solution* saline analogue à celle de la formule 33, ce qui a pour but d'arrêter la plus grande partie des rayons infra-rouges, et de fournir une bonne luminosité en même temps qu'une lumière ne fatigant pas la vue) a donné aux essais les caractéristiques suivantes.

Type	E_n	L_h	c	L_s	P_u	w	$\frac{R_n}{R_o}$	$L_h = AE^m$	F
Lampe Soleil (100 b.)	120	72	0,98	70,6	64,26	0,91	16,1	$0{,}45 \times 10^{-6} \times E^{3,95}$	887,4

N. B. — La caractéristique graphique de cette lampe *se confond* avec celle de la lampe à gaz Faust (100 b.) ; elle présente donc, pour un *courant égal*, une résistance identique ; mais R_o est plus faible pour la lampe-soleil ; donc $\frac{R_n}{R_o}$ est un peu plus grand ; les coefficients A et m de ces 2 lampes sont comparables ; w est plus grand qu'avec les lampes claires de 100 b. (à cause de l'absorption par l'ampoule colorée).

5° *Lampes Philips*. — Voici les caractéristiques de quelques *lampes Philips* étudiées en 1919 et 1922 ; il s'agit toujours de lampes en atmosphère gazeuse ; nous n'avons déterminé que quelques formules de L_h en $f(E)$; nous ajoutons, au bas du tableau, la lampe Philips (50 bh) qui a servi à *étalonner* toutes les lampes (gaz) qui précèdent, types : *Faust* et *Mazda* ; Les intensités lumineuses sont exprimées en *bougies décimales* et w est rapportée à la *bougie décimale* ; F est en lumens.

Types (indiqués)	E_n	L_h	c	L_s heffn.	L_s b. déc.	P_n	w	$\frac{R_n}{R_o}$	$L_h = AE^m$	F (lumens)	ANN
32 bougies	115,5	32		»	31.4	29,5	0,94	14,9	$5{,}89 \times 10^{-6} \times E^{3,26}$	394,7	19
50 —	120	44.6		49	43.7	40.1	0.92	15,1	»	549,3	
100 —	120	89,6	0,98	98,4	87.8	68,4	0,78	15,3	»	1 103,6	
200 —	119	178,1		195,6	174.5	115,5	0,66	15	$2 \times 10^{-3} \times E^{2,38}$	2.193,5	
400 —	119	353,6		388	346.6	190,8	0,55	15,7	$2 \times 10^{-4} \times E^{3,01}$	4.356,7	19:
600 —	115,5	531,2	1,04	621	552,4	296.7	0,54	15,8	$3{,}13 \times 10^{-4} \times E^{3,02}$	6.943,7	
1.000 —	116	887,5		1.040	923	475,9	0,51	16,1	$6{,}69 \times 10^{-5} \times E^{3,45}$	11.602,1	
* 50 — (étalon)	120,5	45,5	0,98	»	44,6	38,2	0,86	15,6	$1{,}19 \times 10^{-7} \times E^{4.12}$	560,6	19:

N. B. — Sauf pour la lampe de 200 bougies, qui présente une anomalie, l'on voit que le coefficient m diminue (et A *croît*) avec la puissance lumineuse des lampes. La lampe de 50 bougies (1924), dont nous avons déjà parlé à propos des mesures photométriques, — et que nous avons étalonnée (§ 85.), — est très comparable aux lampes de 50 b. Faust- et Mazda, au point de vue de w (un peu plus faible), et de $\frac{R_n}{R_o}$; la formule, $L_h = f(E)$ présente une valeur un peu plus grande pour m, mais un peu plus *faible* pour A.

Enfin, l'on voit que le tungstène de cette lampe n'est *pas le même* que celui des lampes de 1922 (fabriquées en 1920) ; (par la valeur du coefficient $\frac{R_n}{R_o}$).

6° *Lampes Philips* (*argenta*) ; ces lampes en atmosphère gazeuse, nous ont donné les caractéristiques suivantes : (w est rapportée à la bougie décimale) ; L_h est en bougies décimales ; F en lumens.

Types	E_n	L_h	c	L_s (heff)	L_s (b.d.)	P_n	w	$\frac{R_n}{R_o}$	$L_h = AE^m$	F	Année
50 bougies	112	35	0,98	38,5	34,3	36,7	1,07	14,8	$6{,}85 \times 10^{-3} \times E^{1{,}81}$	431,1	1922
100 »	112	74 1/3		81,6	72,8	62,2	0,85	15,4	$1{,}87 \times 10^{-5} \times E^{3{,}22}$	915,1	
200 »	118	155,1		170,3	152	116,8	0,77	15,6	$2{,}48 \times 10^{-5} \times E^{3{,}?8}$	1.910,6	

N. B. — La consommation spécifique de ces lampes est plus grande, à intensité lumineuse égale, que celle des lampes claires (à cause de l'absorption de radiation par l'ampoule). Nous pouvons remarquer, par comparaison avec le tableau des lampes *Mazda-émail* que ces dernières ont un *rendement lumineux plus grand* (w est plus faible) ; nous l'avions indiqué déjà au § 102. Notons l'analogie très grande entre les lampes 100 bougies (émail et argenta) au point de vue de la formule : $L_h = f(E)$.

Remarque. — Les lampes *émail* et *argenta* donnent un spectre plus riche en *radiations sélectives* que les lampes à ampoule claire : il est plus étendu dans le violet que dans le bleu ; elles conviennent particulièrement pour l'*éclairage des laboratoires* et la *photographie*.

7° *Lampes Nernst*. — Nous donnons ci-après les caractéristiques des 2 lampes Nernst étudiées précédemment (type A, *intensive* ; type B) ; L_h et L_s en *bougies décimales* :

Types	E_n	L_h	c	L_s	P_n	w	$\frac{R_n}{R_o}$	$L_h = AE^m$	F
Type A	101	52	1,25	65	85,85	1,32	»	»	817
Type B	260	30 (max)	0,80	24	50,79	$w' = 1{,}69$	»	$2{,}23 \times 10^{-3} \times E^{1{,}71}$	301.7

L'exposant m de la formule $L_h = f(E)$ du type B est le plus faible de tous ceux des lampes à incandescence ; la consommation spécifique w' (par bougie horizontale maxima) rappelle celle de l'ancienne lampe au tantale ; $\frac{\Delta L_h}{\Delta E}$ prend une *très faible valeur* (cette lampe est *plus fixe* que les lampes à filaments métalliques.

118. 8° *Lampes Z* (*Société Lacarrière*); *Lampes Visseaux*. — α) La *Société Lacarrière* fabrique des lampes au tungstène (dans le vide, et en atmosphère gazeuse).

Les lampes dans le vide se font de 105 à 130 volts (5 à 50 bougies) et de 200 à 250 volts (10 à 50 bougies) en forme d'ampoule cylindrique, ou sphérique (fig. 62); cette société fabrique également des lampes à ampoule forme *flamme*, de 10 à 25 bougies ; à ampoule forme tube (de 5 à 25 bougies); des lampes à *atmosphère gazeuse* (forme habituelle du filament, comme dans les lampes Faust, Mazda, ou Philips), de 105 à 130v (32 à 3.000 bougies), et de 200 à 250 volts (32 à 3.000 bougies); une lampe *zédolite*, à filament spiralé, droit, de 16 à 50 bougies pour laboratoires (fig. 63).

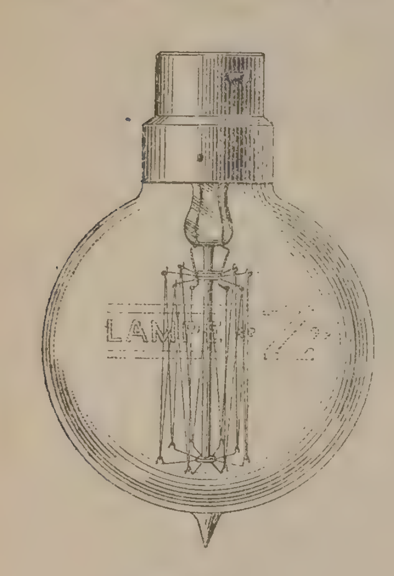


Fig. 62.

Les consommations spécifiques sont les suivantes (lampes à gaz) rapportées à l'*intensité horizontale* : 32 bd: 0w94 ; 50 bd : 0w90 ; 100 bougies : 0w75 ; de 200 à 1.500 bougies, la consommation est toujours de 1/2 watt (indiquée).

β) La *Société Visseaux* (à Lyon) fabrique des lampes à vide (au tungstène), de 5 à 50 bougies décimales (105 à 130v) ; et les mêmes, de 200 à 250 volts, en forme de poire (fig. 64), ou sphérique (filament toujours en zig-zags), ainsi que des lampes à ampoule-flamme, à ampoule-tube ;— les lampes au tungstène en atmosphère gazeuse, se font de 32 à 3.000 bougies (forme sphérique), avec consommation spécifique (par bougie horizontale), de :

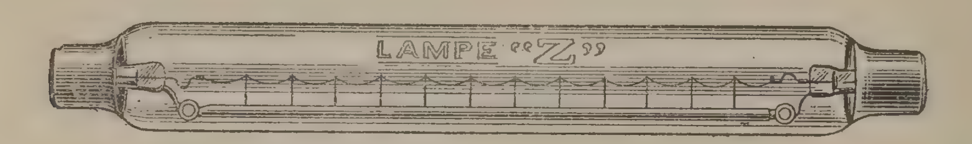


Fig. 63.

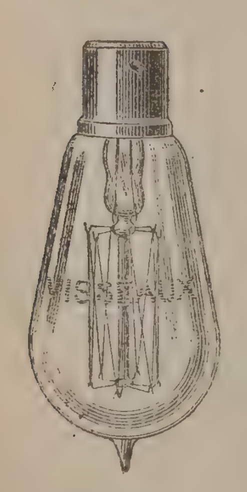


Fig. 64.

0w94 (32 b.) ; 0w90 (50 b.); 0w75 (100 bougies); 1/2 watt (200 à 3.000 bougies), toujours avec la forme habituelle du filament; cette société fabrique une lampe à *ampoule bleue* (lampe *Vix*, qui donne une bonne luminosité comme la lampe Soleil), de 50 à 600 bongies horizontales *consommant par bougie* : 1 watt (50 b.) ; 0w75 (100 bougies) ; 1/2 watt de 200 à 600 bougies.

γ) La société de la *lampe Fotos* (Lyon), fabrique également toutes les séries de lampes au tungstène.

119. *d*) **Lampes de très grandes intensités lumineuses.** — Pour remplacer l'arc électrique (voy. chap. II ; 2ᵉ Partie), il y a intérêt à fabriquer des lampes de très grande intensité lumineuse, à foyer presque *ponctuel*, à atmosphère gazeuse, et très poussées, à filament *gros* et *court*, alimentées par un courant de grande intensité, sous tension faible (50 ampères sous 20 volts, par exemple). M. Holweck indique le procédé nouveau de fabrication de ces lampes (du mois de mai 1922) :

Le col de l'ampoule est fermé par un culot métallique, avec anneau de caoutchouc formant joint entre les 2 pièces, avec presse-étoupe (le culot est de format ordinaire); le caoutchouc doit être épuré de toute substance volatile.

Le filament est supporté par 2 tiges de nickel fixées sur le culot; l'une est reliée à la masse, l'autre à une électrode isolée qui traverse le culot et est pourvue d'un joint étanche en caoutchouc (ce dispositif résiste bien à une température de 100° centigrades).

Un type intéressant de ces nouvelles lampes (en atmosphère d'azote), donne 3000 bougies décimales, sous 22 volts avec 45 ampères ; la consommation spécifique est donc :

$$w = \frac{45 \times 22}{3000} = 0 \text{ walt } 33 :$$

c'est *la plus faible* que l'on ait obtenue ; elle est comparable à celle d'un *arc à flamme* (voy. chapitre II ; 2ᵉ partie).

120. *e*) **Lampes pour laboratoires.** — Nous avons indiqué déjà les lampes qui conviennent aux travaux de laboratoires (lampes à ampoule opaline, argenta ou émail), parce qu'elles fournissent une lumière très blanche.

Pour les *appareils électriques de mesure* (galvanomètres), il est nécessaire d'utiliser des lampes à filament droit (telle la lampe de la fig. 63).

La *Compagnie générale des Lampes* fabrique des lampes à cet usage (procédé *Thovert*) ; elles s'emploient sous des tensions de 4 à 6 volts seulement, absorbant de 16 à 21 ampères, en donnant 16 à 140 b. d., avec *éclat* du filament de 58 à 518 bougies-centimètre-carré (supérieur à celui de la lampe Nernst) ; le filament est renfermé dans l'argon, l'ampoule est cylindrique. Le modèle de 20 ampères (5 volts 3 ; 78 b. d. ; éclat 289 b. cent. carré, — pour *enregistrement photographique* des diagrammes, ou *examen métallographique*), a un filament de tungstène de 0 m/m 45 de diamètre et 6 m. de long, *tendu* par un ressort. On les utilise sur courant continu (piles sèches, accumulateurs) ou sur courant alternatif (avec un *transformateur-réducteur* de tension).

La lampe de 2ᵃ (pour éclairer les miroirs de galvanomètres), a un filament de 0 m/m 1 de diamètre, et 3 c/m de long.

121. *f*) **Lampes pour phares et projections.** — La *Société Sautter-Harlé* fabrique des lampes pour *les phares*, avec un filament de tungstène spiralé dans une atmosphère d'azote, et pour les puissances lumineuses utilisant 200, 1000 et 3000 watts; éclat moyen obtenu : 8 b. cent. carré; on leur joint un réflecteur de diamètre 4 à 5 fois plus faible que pour les lampes à pétrole; ce réflecteur est de forme paraboloïde, et la lampe est au foyer commun de toutes les paraboles génératrices du réflecteur, afin d'obtenir des rayons réfléchis parallèles à l'axe; par suite, sortant suivant un faisceau de rayons cylindriques.

Elle fabrique également des *lampes pour projections*, avec miroirs de 14 c/m de diamètre; les lampes sont alimentées par des piles sèches elles sont à bas voltage); on utilise une lunette monoculaire à prismes avec réticule, pour *pointer* avec exactitude sur le poste sur lequel on projette.

Pour les *terrains d'aviation*, elle fabrique des lampes à incandescence de 3000 bougies, avec réflecteur parabolique de 60 c/m de diamètre. Le filament a 2 m/m de diamètre et 18 c/m de long; le foyer du réflecteur est disposé près d'une des extrémités du filament, de façon à ne pas éblouir le pilote.

F. — Installation des lampes sur les canalisations d'éclairage électrique

122. — Nous verrons plus loin (*IIIe Partie*) comment on choisit les lampes destinées à l'éclairage d'une salle (bureau, appartement, atelier, etc.), et quel emplacement il faut leur attribuer pour obtenir un *bon éclairement*.

Nous voulons, tout d'abord, montrer comment une lampe à incandescence, quel que soit l'emplacement adopté, est installée sur la distribution des fils conducteurs du courant (continu ou alternatif), et quels sont les appareils qu'il faut lui adjoindre pour la mettre en circuit, et la protéger contre les accroissements imprévus du courant d'alimentation, quelle qu'en soit la cause.

a) Pour les *voies publiques*, toutes les lampes d'un secteur sont installées entre 2 câbles de distribution, et *en dérivation* : chacune étant choisie pour la tension électrique du réseau dont on dispose entre ces câbles (110 à 115 volts généralement) : un *interrupteur général* (du même type que celui que nous allons décrire) commande un groupe de lampes, — lesquelles fonctionnent d'ailleurs indépendamment les unes des autres, puisqu'elles sont en dérivation : il suffit de *couper* le courant sur l'un des câbles pour supprimer l'alimentation du groupe.

b) Pour l'*éclairage privé* (ateliers, appartements), un *compteur d'énergie* est disposé à l'entrée du courant dans l'installation, entre l'interrupteur (de préférence *bipolaire*, pour plus de sécurité) et le groupe de

lampes. Des *coupe-circuits* sont placés entre l'interrupteur et le compteur.

Chaque lampe L est pourvue, elle-même, d'un coupe-circuit K (fig. 65) et d'un interrupteur AB; ces 2 organes étant placés comme l'indique la figure : un levier *ab* (à manette isolante en ébonite *m*) est pourvu d'un ressort antagoniste et peut être amené dans la position de la figure : le circuit est *ouvert*, la lampe ne fonctionne pas; si l'on tourne *ab* de 90° (sens des flèches), *b* vient au contact d'un plot B; *a* à celui d'un plot A : le circuit est *fermé*, la lampe s'allume. Ce dispositif permet ainsi l'allumage séparé de chaque lampe, au fur et à mesure des besoins; donc d'éviter une dépense inutile de courant, quand on n'a pas besoin d'un éclairage général.

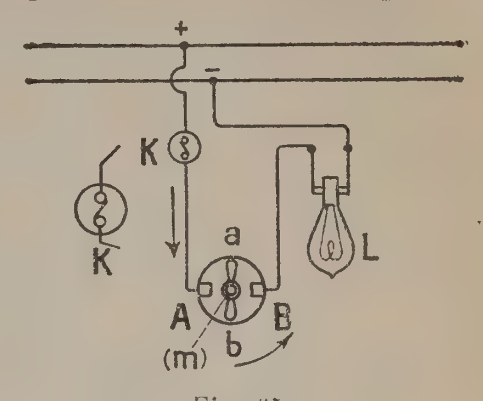


Fig. 65.

La fig. 66 montre un groupe de 2 lampes (L_1L_2) installé en P et N sur les câbles, avec interrupteur-commutateur à 3 directions; tourné selon (A_3B_3), il ouvre le circuit, aucune lampe ne s'allume; tourné selon (A_1B)$_1$ il ferme le circuit pour la lampe L_1 seule; tourné selon (A_2B_2), il ferme le circuit pour la lampe L_2. La lame en laiton (A_1A_2) a un épanouissement angulaire qui permet cette manœuvre.

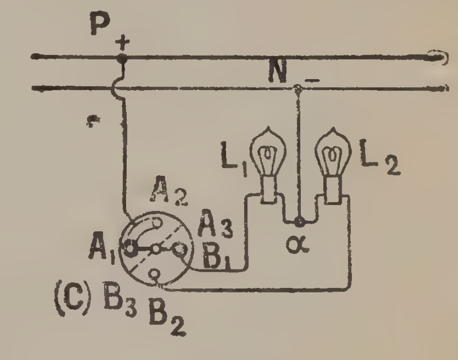


Fig. 66.

c) Dans les *laboratoires photographiques* (où l'on manipule des *plaques sensibles*, ou des *produits sensibles* à la lumière blanche); ou dans les *cabinets noirs* (où l'on révèle des plaques sensibilisées à la lumière blanche) l'on emploie des *lampes électriques rouges* (*verre rouge* préparé dans la pâte du verre de l'ampoule, ou lampe ordinaire enveloppée d'un écran en papier rouge) qui ne laissent passer que des radiations n'ayant aucune action chimique sur les produits sensibles.

F'. — Lampes-avertisseurs

123. — Outre leur application à l'éclairage électrique, les lampes à incandescence sont utilisées comme *avertisseurs* : c'est-à-dire que, disposées convenablement, elles indiquent si un circuit est fermé, et sous quelle tension (on choisit des lampes fonctionnant sous la tension du circuit).

α) Sur les *voitures de tramways électriques*, par exemple, une lampe montée en dérivation entre le câble de distribution et le retour aux rails indique par son allumage, que le courant circule aux moteurs des voi-

tures ; — sur un *tableau de distribution* (station ou sous-station) une lampe branchée entre les bornes de départ et d'arrivée indique que le réseau est alimenté ; elle s'*éteint* quand ce réseau est interrompu pour une cause quelconque.

β) On vérifie le *couplage de 2 alternateurs* (que l'on monte toujours en *parallèle*) en disposant deux lampes à incandescence (fonctionnant chacune normalement sous la même tension (E_1) que chacun des alternateurs) comme le montre la fig. 67 : l'alternateur (G_1) est relié à la ligne de distribution (LL') ; l'autre (G_2) n'est pas encore mis sur la ligne (l'interrupteur K étant ouvert) ; les fils ($\alpha\beta'$), ($\alpha'\beta$) joignent les pôles de noms contraires des 2 machines ; les lampes en questions (l, l') sont en *série* entre (β et α') ; à l'instant considéré (cas de la figure) il circule un courant, sous la tension ($2E_1$), dans le circuit ($P_1\alpha\beta'P'_2$ — $P_2\alpha'l'l\beta P'_1P_1$) ; alors les deux lampes brillent ; si leur éclat se maintient, les 2 alternateurs ont bien leurs f. é. m. *en opposition* entre elles, mais *en concordance* par rapport au circuit (L,L') : on ferme alors K, et le couplage est effectué.

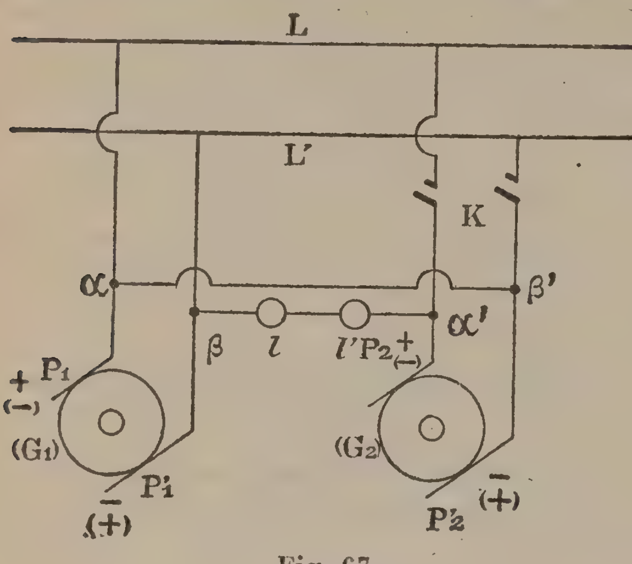


Fig. 67.

γ) On utilise les lampes pour vérifier *le bon isolement* des lignes de distribution et de la manière suivante : 2 lampes (de 110 volts, par exemple, s'il s'agit de vérifier l'isolement d'une distribution sous 110 volts) sont mises *en série* entre 2 points M et N des câbles conducteurs (mis à nu) ; un point K intermédiaire est relié *au sol* par l'intermédiaire d'une sonnerie S et d'une plaque métallique de contact T. Si les câbles sont *parfaitement isolés* de la terre, on aura une différence de potentiels de 110 volts entre M et N, et chaque lampe fonctionne sous 55 volts : elle *rougira faiblement*. Si une *perte au sol* a lieu sur le câble (—), du côté du point N, un courant dérivé se produira entre le câble (+) et la terre, allant donc de M à T, en passant dans la lampe L qui brillera vivement, et dans la sonnerie S qui vibrera. En déplaçant les points de contact, M ou N, on trouvera ainsi, par l'*éclat* le plus vif de l'*une* des 2 lampes,

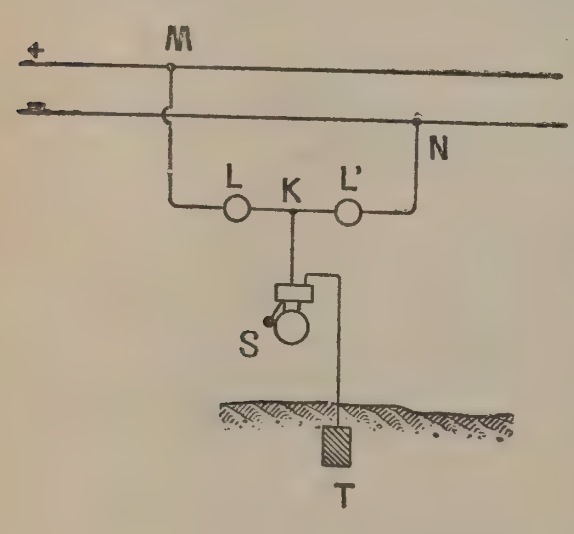


Fig. 67 *bis*.

la *position* de la perte à la terre, que l'on pourra ainsi supprimer par une réparation convenable du câble incriminé.

δ) On emploie encore des lampes sous faible tension (8 à 10 volts), alimentées par des piles, pour avertir de la fermeture ou de l'ouverture d'un circuit comprenant une porte (d'appartement, ou de coffre-fort); si la porte est fermée, les contacts étant assurés, la lampe s'allume; elle s'éteint quand la porte s'ouvre. Ce mode d'avertissement est préférable à une sonnerie (naturellement bruyante).

G. — Soins à donner aux lampes

124. 1° *Précautions à prendre* a priori. — *a*) Dans une salle où des poussières se dégagent dans l'atmosphère (*ateliers, usines*, salles de classe), ou sur les voies publiques, il est nécessaire de nettoyer les ampoules, à intervalles assez rapprochés, pour rendre à celles-ci leur transparence et obtenir une bonne clarté, et pour éviter l'incorporation des poussières dans la douille (ce qui pourrait altérer les contacts).

b) Dans les salles d'appartement, ou dans les laboratoires, où se dégagent de la vapeur d'eau ou d'autres vapeurs corrosives, il est nécessaire d'envelopper l'ampoule d'un globe étanche raccordé à la douille, ou au réflecteur, pour protéger contre la corrosion les parties métalliques de la lampe.

c) Il doit en être de même dans les *ateliers* de *filature* et de *tissage*, et dans tous ceux où l'atmosphère ambiante dégage des particules inflammables; dans les filatures par exemple, les filaments ténus de lin ou de coton qui se déposent sur une ampoule sont fortement chauffés (vu la température assez élevée de celle-ci) et peuvent en se dissociant, s'enflammer et communiquer une explosion dans cette atmosphère particulièrement propice; un globe étanche est donc indispensable, bien qu'il abaisse le rendement lumineux des lampes : il suffit de les prendre avec une intensité lumineuse plus forte. Dans les *mines*, à cause de l'*atmosphère grisouteuse* probable, les lampes doivent présenter une *étanchéité parfaite;* il est nécessaire de les envelopper d'un globe vissé sur la douille, afin d'empêcher tout contact dangereux, ou le danger d'une *étincelle*.

2° *Précautions à prendre pour le nettoyage*. — *d*) La tension de courant, même en continu, de 110 volts, — *a fortiori* celle de 220 volts, — n'est pas sans présenter de danger pour les personnes qui ont à essuyer une lampe en fonctionnement. Des traces d'humidité sur l'ampoule apportées par la main de l'opérateur, peuvent provoquer des accidents mortels. Une personne (à Vienne, en 1920) a été électrocutée pour avoir touché une ampoule avec des mains humides (la tension de distribution était de 220^{v} alternatifs); cependant la douille était *bien isolée* du sol, et la main n'avait pas été en contact avec elle. Des éclaboussures de lait

de chaux (provenant d'un blanchiment de la pièce) s'étendaient de la douille à l'ampoule sur une longueur de 3 c/m, en formant une bande de 3 m/m seulement d'épaisseur), ce qui avait établi un contact entre la douille et le sol, par le corps de la personne en question.

On a cherché à établir les *conditions de danger* offertes par une lampe malpropre (recouverte d'*eau* plus ou moins conductrice; ou de la *sueur* de la main, ou d'une solution saline quelconque). En passant en *a* (fig. 68) sur une ampoule de lampe installée, une légère couche d'eau salée (ou de sueur), on peut établir à l'aide d'un générateur G (magnéto, batterie d'accumulateurs) relié à cette couche *a* et au culot C de la lampe (bien isolé du sol par la douille, d'ailleurs), un courant sous 220 volts, par exemple ; un voltmètre en V indique 70ᵛ entre *a* et C; la tache étant à 4 c/m seulement de la douille, on obtient 130ᵛ, *tension dangereuse.*

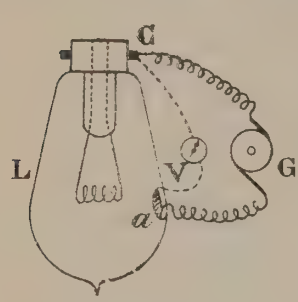


Fig. 68.

Il faut donc, lorsqu'on procède au nettoyage d'une ampoule (il est préférable de le faire quand la lampe est allumée, car le filament qui se trouve à une température élevée se ressoude automatiquement si une légère secousse est produite; *à froid*, il pourrait y avoir rupture sans recours), — il faut, disons-nous, opérer avec un linge *bien sec*, éviter de toucher l'ampoule avec la main nue et aussi de toucher les organes métalliques (culot, douille).

II. — Règlements sur la construction et la réception des lampes à incandescence

125. *a*) En ce qui concerne la *construction* des lampes proprement dites (ampoules, armatures, filaments, vide, vérification du calibrage et de la puissance lumineuse, fermeture; adaptation du culot), toute initiative est laissée à l'industrie, et chaque constructeur opère comme il l'entend.

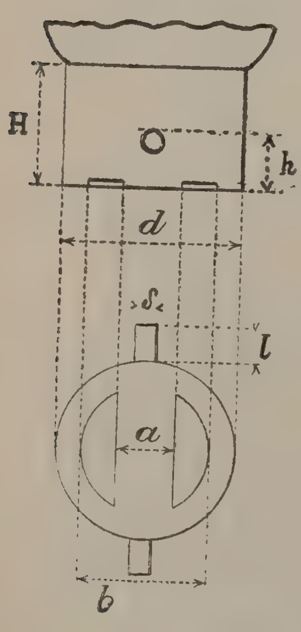


Fig. 69.

Une *seule condition* est fixée, d'accord commun entre les fabricants, pour que toute lampe sortant d'une firme quelconque, puisse être installée indistinctement sur n'importe quelle prise de courant : il suffit pour cela que toutes les *douilles*, et tous les *culots* de lampes par conséquent, soit déterminés d'après un calibrage unique. Voici les *dimensions adoptées* par le *Syndicat professionnel des Industries électriques* (fig. 69), pour le *culot à baïonnette* :

(45)
- Hauteur du culot au-dessus des pastilles de contact : $H = 14^{mm}$. ;
- Hauteur des ergots (ou brides) au dessus des pastilles : $h = 6$ à 7 mm. ;
- Diamètre extérieur u culot : $d = 21$ à 22 mm. ;
- Diamètre des ergots : $\delta = 1\,{}^{1}/_{2}$ à 2 mm. ;
- Longueur des ergots : $l = 2\,{}^{1}/_{2}$ à 3 mm. ;
- Ecartement des pastilles (condition *plus stricte*) $a = 3$ mm.;
- Distance entre les parties extérieures des pastilles $b = 14$ mm.;
- Hauteur de la douille (entre les contacts et le bord supérieur vers l'ampoule) : 10 à 12 mm. ;
- Diamètre de la douille (intérieur) : 22 à 23 mm. ;

Pour le *culot à vis*, la hauteur totale du culot, et son diamètre (y compris le filet de vis), sont les *mêmes*; l'unique pastille est au centre de la base du culot, avec une largeur de 5 à 6 m/m.

b) Pour la *réception* des lampes, l'Union des Syndicats de l'Electricité en 1922, a donné les règles suivantes, qui doivent figurer au Cahier des charges pour la fourniture des dites lampes à *filament métallique* :

1° L'intensité horizontale L_h (*maxima*, dans le plan perpendiculaire à l'axe de symétrie de la lampe, qui est celui du *pied*), doit être indiquée sur le culot;

2° La relation entre L_s et L_h doit être voisine de 0,8 (coefficient de réduction sphérique; nous avons vu qu'il est un peu plus faible, compris entre 0,76 et 0,78 ; la condition précédente nécessite une légère modification dans la forme du filament; à la rigueur, on peut l'adopter aux lieu et place du nombre 0,80; — qui se rapporte plutôt aux lampes à filament de carbone);

N. B. — Ces conditions accompagnent la livraison de 200 lampes au moins du même type.

3° pour un nombre de lampes à livrer inférieur à 500, on doit soumettre à l'essai 50 de ces lampes, de même intensité L_h et sous la même tension E ;

4° les défauts du filament doivent être observés au *rouge sombre*, sous une tension égale aux 40 % de la tension normale (soit de 44 à 48 volts pour lampes de 110 à 120 volts);

5° chaque lampe doit indiquer, sur le culot de l'ampoule, L_h en *bougies décimales*, ou P_n en watts; E_n (d'utilisation), et la *marque du fabricant* ;

6° Les essais de l'intensité L_h et de la consommation spécifique : $w = \frac{P_n}{L_s}$, ou $w' = \frac{P_n}{L_h}$, doivent être effectués après 20 heures de fonctionnement de la lampe sous sa tension normale ;

Les *valeurs limites* de w' et de durée, imposées pour lampes de 100 à

125 volts, — ou de 190 à 220 volts, — sont les suivantes pour les puissances lumineuses ci-après :

Types	10 b. d.	16 b.d.	25 b. d.	32 b. d.	50 b. d.	100 bd.	Observation
$w' = \frac{P_n}{L_h}$	1,45	1,31	1,24	1,23	1,23	1,23	Val. *maxima*
Durée utile	500 ^{h}	1000^h	1000^h	1000^h	1000^h	1000^h	Val. *minima*

7° La tension E_n ne doit pas varier de plus de 2 % (en valeur absolue) pendant les essais;

8° En *fin de durée utile*, les lampes qui précèdent doivent présenter des *intensités lumineuses minima* (L_h) de : 8, 13, 20, 25, 40, 80 bougies décimales.

IIe PARTIE. — LAMPES A ARC

126. Principe des lampes à arc. — Nous avons indiqué, au § 21, que l'*arc électrique* est un foyer lumineux qui fonctionne, à la fois, par *incandescence* (des pointes des électrodes) et par *luminescence* de l'arc lui-même.

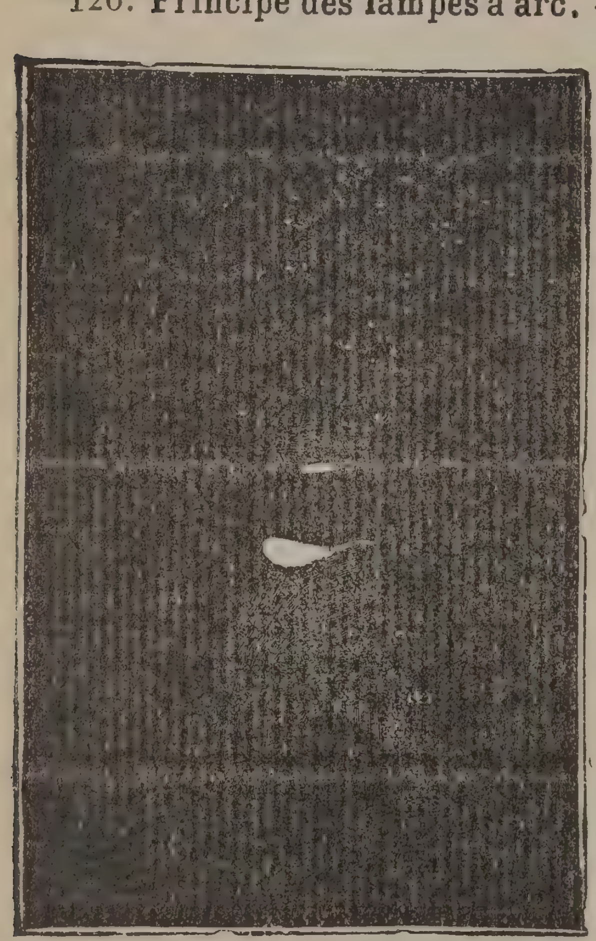
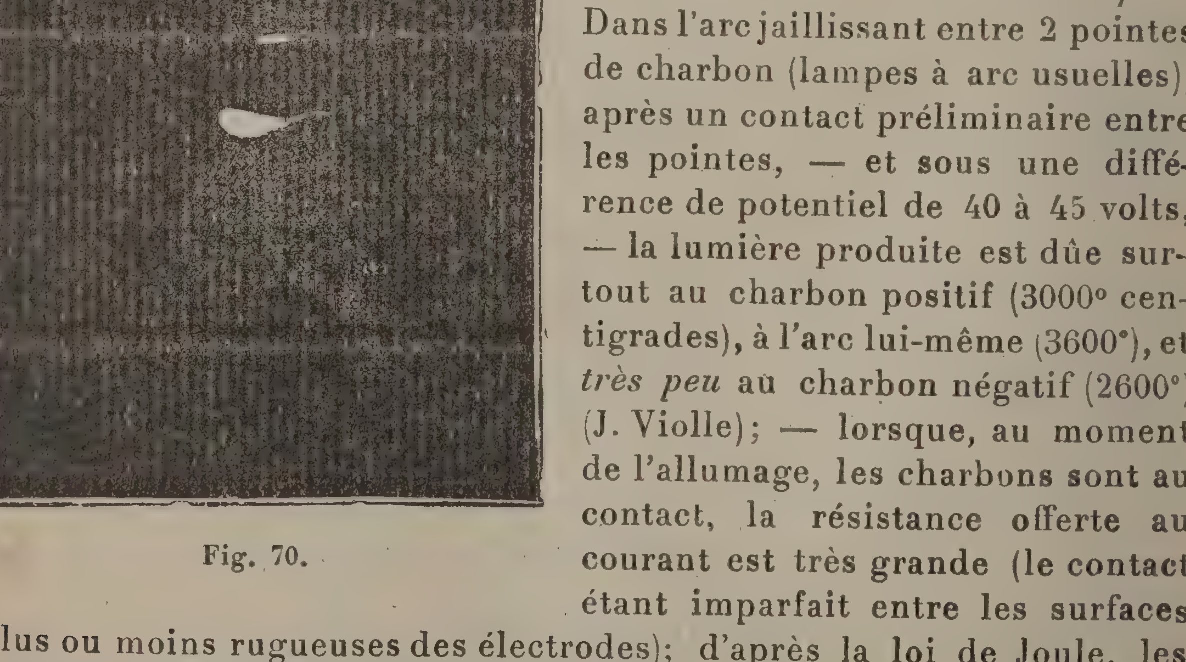


Fig. 70.



Nous admettrons dans ce qui va suivre, que le courant utilisé est *continu* ; — nous indiquerons plus tard le cas du *courant alternatif*. — Dans l'arc jaillissant entre 2 pointes de charbon (lampes à arc usuelles), après un contact préliminaire entre les pointes, — et sous une différence de potentiel de 40 à 45 volts, — la lumière produite est dûe surtout au charbon positif (3000° centigrades), à l'arc lui-même (3600°), et *très peu* au charbon négatif (2600°) (J. Violle); — lorsque, au moment de l'allumage, les charbons sont au contact, la résistance offerte au courant est très grande (le contact étant imparfait entre les surfaces plus ou moins rugueuses des électrodes); d'après la loi de Joule, les contacts s'échauffent, et passent à l'incandescence ; de plus un *organe*

automatique commandé par le courant lui-même, et qui se nomme *régulateur*, entrant alors en jeu, *écarte* légèrement les électrodes : l'*arc s'allume* grâce à l'*électrovaporisation* de la *cathode* incandescente, (voy. § 127); des particules de charbon détachées des pointes se volatilisent et sont transportées du charbon positif au charbon négatif ; le premier s'use et se creuse en *cratère* (fig. 70, au-dessous), le second s'accroît légèrement en se recouvrant de particules de *graphite*, en lequel s'est transformé le charbon dans l'arc (à l'ébullition), charbon de dessus (fig. 70); les particules de charbon transportées par l'arc étant incandescentes, ajoutent à sa luminescence ; il y a, également, *combustion* d'une partie du charbon ainsi volatisé, au moment où il est arraché de l'électrode positive; l'arc est donc rendu *conducteur* par les particules de charbon qu'il véhicule.

Ces faits expliquent que la lumière fournie par un arc est dûe *pour la plus grande partie* au charbon positif qui produit les 85 % de la lumière totale ; l'arc (grâce à sa *luminescence*) en donne 10 % seulement; le charbon négatif n'en produit que 5 %. L'on voit donc que l'arc fonctionne peu à la luminescence, mais *surtout à l'incandescence.*

Si l'on considère, pour un instant, que le charbon positif est la seule source de lumière, et que ce charbon est un *corps gris*, en lui appliquant la formule de Wien (form. 6; § 12) : $\lambda_m \times T = b = 2940$; ($T = 3000^\circ + 273^\circ = 3273^\circ$); il viendra pour la longueur d'onde λ_m correspondant à l'énergie maxima émise :

$\lambda_m = \dfrac{2940}{3273} = 0{,}898$; on voit que l'*énergie maxima* est *très voisine du rouge* (au bord du spectre visible); ce résultat est à rapprocher de ceux fournis par le filament de carbone (§ 27), et le filament de tungstène (§ 37); il montre la *supériorité de l'arc*, au point de vue des *radiations sélectives*, et encore n'avons-nous tenu compte que de l'incandescence du charbon positif. Il faut ajouter, à cette incandescence, la *luminescence* de l'arc, qui donne de la *lumière violette* ; il en résulte donc que la lumière de l'arc est la plus riche en radiations visibles.

L'éclat du cratère positif, — sensiblement proportionnel à la racine carrée de la densité du courant (M. A. Blanc), — atteint facilement 30.000 bougies-centimètre-carré ; — le *rendement lumineux* est comparable à celui des lampes à filament de tungstène en gaz inerte (de 200 à 1000 bougies et plus).

L'inconvénient grave présenté par l'arc électrique est la présence du *régulateur* nécessaire pour maintenir *constante la longueur de l'arc*, donc aussi pour maintenir constante *l'intensité lumineuse* qui en dépend, — ce régulateur absorbe une fraction appréciable de l'énergie électrique fournie à la lampe, et ceci en *pure perte*, puisque cette énergie ne se transforme pas en lumière ; et il faut en tenir compte dans l'évaluation de la consommation spécifique.

De plus, une lampe à arc fonctionnant sous 40 à 45 volts, il faut en disposer plusieurs en série sur un réseau ordinaire à 110 volts, et elles ne sont plus indépendantes dans leur fonctionnement. L'usure des charbons (qui peut s'évaluer à 3 ou 4 cm. à l'heure) nécessite un remplacement de ceux-ci au bout d'un certain temps ; d'où une manutention coûteuse.

La lumière de l'arc (vu son *éclat très puissant*) est *éblouissante*, ce qui constitue une *gêne* pour la vue ; il faut envelopper cet arc d'un globe opalin qui *absorbe* une fraction de l'énergie : ce qui diminue encore son rendement.

N. B.— Tous ces motifs expliquent la disgrâce dans laquelle est tombée la lampe à arc, surtout en présence des lampes au tungstène en atmosphère gazeuse ; lesquelles, si leur consommation spécifique est déjà plus faible, ont encore cet avantage de durer plus longtemps, et de n'exiger aucune manutention coûteuse, ni aucun organe supplémentaire absorbant inutilement l'énergie électrique.

Mais *l'arc électrique* peut encore recevoir des applications spéciales pour lesquelles il est plus avantageux, somme toute, que la lampe à incandescence, et que nous indiquerons par la suite.

127. **Ionisation dans l'arc.** — M. A. Blondel a le premier signalé le phénomène *d'électrovaporisation* de la cathode incandescente : dès que celle-ci commence à rougir fortement par le passage du courant, les électrons cathodiques étant alors précipités sur l'anode, la portent à l'incandescence, provoquant ainsi une électrovaporisation à l'anode, qui passe dès lors à une température plus élevée, et l'arc s'allume.

La preuve que l'arc ne peut s'allumer que selon ce processus de projections d'électrons, c'est qu'il est *impossible* d'allumer un arc avec une *anode incandescente* et une *cathode froide*, il faut que cette dernière s'*ionise* en émettant des électrons sur l'anode (M. M. A. Blondel, Stark et Cassuto).

M. Garbarini a construit une lampe à arc avec cathode en *métal refroidi* par une circulation d'eau (intérieure à cette cathode, en forme de tube creux), et qui sert pour la télégraphie sans fil, et comme émetteur d'ondes ; — la réussite du fonctionnement d'un arc avec cathode refroidie semble anéantir le principe de la nécessité d'une cathode incandescente. Mais M. A. Blondel explique ainsi le phénomène produit dans cet arc : une partie du carbone vaporisé par *l'anode incandescente* se dépose en couche mince sur la cathode ; donc, c'est sur une cathode de charbon très mince, et qui peut atteindre facilement l'incandescence malgré le refroidissement du support, que doit jaillir l'arc.

128. **Pressions sur les électrodes.** — Dewar, en 1888, a montré l'existence d'une pression sur les électrodes de l'arc, à l'aide d'un manomètre à eau ; sur l'anode, elle est *positive*, et varie de 1 à 2 mm. d'eau ; sur la cathode, elle est nulle ou *négative*.

Outre cette pression *hydrostatique*, Duffield, Burnham et Davis ont

montré l'existence d'une pression *mécanique* sur chaque électrode, qui tend à les écarter ; elle s'exerce sur les pôles de l'arc ; on l'observe en suspendant l'une des électrodes, l'autre étant maintenue immobile ; cette pression est 100 fois plus faible que celle (hydrostatique) observée par Dewar sur l'anode.

La réaction engendrée par *l'émission cathodique* des électrons explique la pression sur la cathode ; celle qui s'exerce sur l'anode est due au transfert du mouvement porté par les électrons venant de la cathode.

129. **Arc en vase clos.** — En empêchant l'air d'arriver (pendant un certain temps au moins) au contact des charbons, on rend *l'usure* plus faible. On a un arc *très allongé* (2 ou 3 cm.), mais fonctionnant alors sous une tension nécessairement plus forte (80 volts) ; le globe est fermé par une soupape, qui n'admet l'air que lorsque les gaz de combustion, ayant acquis une tension suffisante s'échappent à l'air. La durée des charbons est prolongée.

La lumière obtenue est à teinte bleue, et le rendement optique est *faible*.

Cet arc n'a plus un grand intérêt ; on l'emploie encore quelquefois à cause de la bonne distribution du flux autour du foyer lumineux.

130. **Arc-flamme.** — Si l'on imprègne, à l'avance, les charbons de sels métalliques, on obtient un arc plus long, ayant l'aspect d'une flamme, et qui produit une plus grande portion de lumière que l'arc entre charbons ordinaires, — ce qui est dû à une plus grande luminescence de l'arc.

Il ne faut pas accroître au delà d'une certaine limite la proportion des sels minéraux introduits ; avec une trop forte proportion, les molécules neutres gênent le passage des ions et la conductibilité de l'arc diminue ; mais les molécules neutres sont choquées par les ions, et portées à l'incandescence.

Les sels de calcium, baryum, strontium (fluorures de préférence) donnent une couleur jaune, verte, ou rouge ; les premiers donnent dans la flamme de l'arc une teinte jaune rougeâtre, de longueur d'onde voisine de 0µ6 ; c'est la meilleure solution de l'arc à flamme, la plus avantageuse au point de vue du rendement lumineux. Avec un sel de magnésium, on obtient une teinte blanche. On peut mélanger des sels de façon à obtenir une couleur qui se rapproche du blanc.

L'arc ainsi obtenu (à *charbons minéralisés*), fournit les 85 % de la lumière totale : il fonctionne donc surtout par *luminescence* ; le charbon positif fournit *à lui seul*, le reste de la lumière. Les charbons sont juxtaposés de façon à former un V, ce qui permet aux scories provenant de la combustion de tomber sans gêner l'émission du flux lumineux. On place généralement et de préférence le positif à la *partie inférieure* (il est minéralisé) ; le négatif (minéralisé ou non) est au-dessus : mais alors, il faut placer, autour du négatif, un disque métal-

lique (*fumivore Blondel*) qui reçoit la couche de scories blanchâtres, et renvoie au-dessous de l'horizon la lumière du cratère positif.

On fabrique des lampes à arc à flamme allant jusqu'à 5000 bougies, avec un *éclat* de 4000 bougies-centimètre-carré ; la consommation spécifique descend à 0,30 ou 0,25 watt par bougie hémisphérique moyenne (la lumière étant au-dessous de l'horizon).

N. B. — Pour toutes les raisons qui précèdent, les *lampes à arc actuelles*, pour lutter avantageusement contre les lampes à incandescence au tungstène (gaz), sont des *lampes à flamme*.

131. **Lampes à arc au mercure.** — On peut faire jaillir un arc, *dans le vide* (à 1 ou 2 m/m), entre des électrodes fusibles, — au moins à la cathode. — Ainsi le mercure, employé comme cathode peut être électrovaporisé facilement en face d'une anode de fer dans un tube vide d'air (lampe Cooper-Hewitt) : on obtient un arc par *luminescence* de la vapeur du *métal cathodique*, dès que les 2 métaux, mis d'abord au contact pour le passage du courant, sont écartés ensuite automatiquement.

N. B. — Il est impossible de faire jaillir un arc entre le *mercure* placé en *anode*, et le fer en *cathode* ; donc, avec les *courants alternatifs*, on ne pourra ni allumer, ni entretenir *à fortiori*, l'arc au mercure. (Nous verrons une explication et une application de cette remarque, dans l'emploi de la lampe à mercure comme *redresseur* de *courants alternatifs*, au chap. IV).

L'arc au mercure (vide) ressemble beaucoup à l'arc entre charbons (air) en ce sens qu'une faible tension électrique suffit pour l'entretenir, avec un courant d'assez grande intensité. La température y est relativement faible ; MM. Buisson et Fabry ont trouvé par la méthode des raies, 1200° centigrades environ (lampe Cooper Hewitt, voy. ci-après).

L'incandescence des électrodes n'intervient nullement, et la lumière est due à la luminescence de la vapeur de mercure (dont la pression est faible), traversée par la décharge cathodique.

Nous verrons le mécanisme qui permet l'amorçage de l'arc ; et nous montrerons que l'emploi du *quartz* s'est subtitué à celui du *verre* dans la confection du tube de la lampe : la raison en est que, pour *augmenter* le *rendement lumineux* il faut *pousser* la lampe, mais alors on obtenait une température voisine de la fusion du verre (vers 1200°) ; le quartz, beaucoup moins fusible, permet de dépasser très sensiblement cette température ; les parois du tube en quartz fondu peuvent être portées au rouge sans perdre leur rigidité, même sous l'accroissement corrélatif de la pression de la vapeur de mercure. Un globe en verre entoure le tube pour atténuer son éclat, et arrêter les rayons *ultra-violets* intenses qui traversent le quartz; (ils sont en effet absorbés par le verre, mais dangereux pour les yeux).

N. B. — On utilise par contre ces lampes à tube nu, pour stériliser l'eau (les rayons ultra-violets *détruisent* les *bactéries*).

On peut corriger la lumière de l'arc au mercure (formée de radiations jaunes, orangées,

vertes et violettes, et dépourvues de rouge) en ajoutant au mercure un métal en petite proportion (amalgame), fournissant des radiations rouges ; — la lumière de la lampe à mercure pur est verdâtre, et donne une teinte désagréable aux objets éclairés.

Néanmoins on l'emploie très couramment, pour l'éclairage des laboratoires, des halls industriels, des façades.

N. B. — Nous parlerons des *lampes* au *néon* un peu plus loin (IIe Partie; 3°).

1° Lampes à arc (aux charbons)

132.— Les *caractéristiques* d'une lampe à arc, sont : *a*) la *tension* aux *bornes* de *l'arc* pour son fonctionnement normal ; et sa *résistance apparente*; *b*) la *tension aux bornes* et la *résistance de la lampe* et la *puissance consommée* (les seules qui intéressent le consommateur de courant) ; *c*) l'*intensité* du courant d'alimentation ; *d*) le *rendement optique* ; *e*) l'*intensité* et le *flux lumineux* ; *f*) la *consommation spécifique* ; *g*) la durée ; grandeurs que nous allons étudier; nous ferons suivre quelques-unes de ces définitions d'un *exemple numérique ;* nous examinerons ensuite : *h*) la *construction des lampes*, et décrirons quelques *types actuels*.

Remarque. — Disons immédiatement que, pour l'*Essai d'une lampe à arc*, la disposition relative de la lampe, de l'ampèremètre, du voltmètre, doit être celle de la fig. 31, la résistance de la lampe R étant très faible vis-à-vis de celle du voltmètre r' on obtient une meilleure approximation pour l'évaluation de la puissance qu'avec le dispositif de la fig. 30, réservé à la mesure des lampes à incandescence.

133. *a*) **Tension aux bornes de l'arc.** — Elle se compose : de la f. é. m. e égale et de signe contraire à la force contre-électromotrice qui entretient l'électrovaporisation à la cathode (et qui est *opposée*, par conséquent, à celle qui entretient le courant dans l'arc) ; et de la f. é. m. nécessaire pour vaincre la résistance r de l'arc, avec le courant d'intensité I; elle vaudra donc ; $E' = e + Ir$.

La *résistance apparente de l'arc* est le quotient : $\frac{E'}{I} = \frac{e}{I} + r = R'$;

qui nous montre que le quotient $\frac{e}{I}$ est une résistance, laquelle est *constante* pour un type donné fonctionnant à *courant constant* (celui-ci dépend du diamètre des charbons), puisque e d'autre part est une *constante* elle-même, dépendant naturellement des électrodes; dès lors $\frac{e}{I}$ sera une résistance constante : a ; et comme r est évidemment proportionnelle à la longueur l de l'arc, nous poserons : $r = bl$; d'où la formule définitive de E' :

$$E' = e + Ibl. \quad (46)$$

On peut même observer que, pour un type donné de lampe, le produit Ib est lui-même constant; posons-le égal à k ; il viendra :

$$(46') \qquad E' = e + kl;$$

(l est exprimée en millimètres; k vaut généralement 2 ou 2,5 ; e, E′ sont en volts ; I en ampères).

Les valeurs de e sont comprises entre 35 volts et 40 volts (charbons ordinaires) ; et 30 volts et 35 volts seulement (charbons minéralisés, d'électrovaporisation plus aisée).

N. B. — Lorsque l'arc *s'allonge* la formule 46 montre que la tension E′ doit croître : ce que vérifie bien l'expérience.

Mme Ayrton a donné, de (E′), une expression plus complexe :

$$(46'') \qquad E' = e + kl + \frac{d + ml}{I};$$

dans laquelle e, I, l, ont la signification donnée précédemment ; k, d, m sont des constantes dépendant des charbons et de l'atmosphère ambiante.

Avec *charbons ordinaires*, on a :

$$(47) \qquad E' = 38{,}88 + 2{,}074l + \frac{11{,}66 + 10{,}54l}{I} \text{(volts)}.$$

MM. E. Guye et Zébrikoff ont trouvé une formule analogue pour électrodes en métal; (pour le fer, le nickel, le cobalt, le cuivre) ; à titre d'indication, voici 2 formules pour le cuivre et le fer :

$$(48) \quad \begin{cases} \textit{cuivre} : E' = 21{,}38 + 3{,}03l + \dfrac{10{,}69 + 15{,}24l}{I}; \\ \textit{fer} : E' = 15{,}73 + 2{,}52l + \dfrac{9{,}44 + 15{,}02l}{I}; \end{cases}$$

elles montrent la facilité avec laquelle on peut entretenir un arc métallique.

134. *b*) **Tension aux bornes de la lampe ; puissance consommée ; résistance apparente.** — A la tension (E′) aux bornes des électrodes, entre pointes (c'est-à-dire aux bornes de l'arc), il faut joindre la chute de potentiels dans le *régulateur* de résistance ρ, c'est-à-dire : Iρ. Si E est cette tension *aux bornes de la lampe*, il viendra :

$$(49) \qquad E = I\rho + E' = e + kl + I\rho.$$

La *puissance totale* consommée pour l'entretien de l'arc sera :

$$(49') \qquad P = EI \text{ watts}.$$

On nomme *résistance apparente de la lampe* (c'est-à-dire la résistance que représente une lampe à arc entre les 2 points d'une distribution où on l'installe), le quotient : $R = \frac{E}{I} = \rho + \frac{E'}{I} = \rho + R'$; (R' a été définie précédemment).

135. *c*) **Intensité du courant**. — Elle dépend du diamètre des charbons ; ou vice versa.

Le tableau suivant donne les concordances entre ce diamètre minimum D mm., et l'intensité I ampères.

I	2 à 3	4 à 5	5	8	10	12	15	20
D	2 à 3	4	5	7	9	10	11	14

Le charbon positif a un diamètre un peu plus fort que le charbon négatif.

On ne construit pas de lampes au-dessus de 20 ampères (cette limite convient au lampes de *phares* ou aux lampes pour *projections cinématographiques*); les lampes de 5 à 6 ampères servent à l'éclairage des avenues, des magasins, des halls.

N. B. — Nous indiquerons plus loin les diamètres des charbons minéralisés : ils sont plus faibles que les précédents, pour une même intensité de courant.

136. *d*) **Rendement optique**. — On le mesure comme nous l'avons indiqué au § 61. Il est plus élevé, nécessairement (étant donné la haute température d'incandescence), que dans les lampes à incandescence. On trouve : 4 % (arc entre charbons ordinaires); 10 % (arc à flamme); le *spectre* fourni par l'arc est très étendu dans le violet et l'ultra-violet; la lumière est riche en radiations sélectives.

137. *e*) **Intensité et flux lumineux**. — A. L'*intensité* d'une lampe à arc, est en général supérieure à celle d'une lampe à incandescence; mais elles sont néanmoins comparable au photomètre Bunsen-Burel ; car, si l'on envisage par exemple le cas d'un arc de 600 b. d. en intensité horizontale, et si l'on prend un *étalon* de 25 b. d. (lampe à incandescence), maintenu à tension constante, dont les distances respectives au photomètre seront d et d' ; si $d' = 25$ centimètres, par exemple, on aura :

$$\left(\frac{d}{25}\right)^2 = \frac{600}{25} = 24; \qquad \text{d'où :} \qquad d = 25\sqrt{24} = 50\sqrt{6} \text{ cm.} = 122 \text{ cm. } 5$$

distance qui n'est pas exagérée pour une expérience de cette nature.

— On opère, naturellement, toujours en chambre noire.

Mais il faut éviter qu'une grande partie des radiations de l'arc ne soient absorbées sur le trajet de l'arc à l'écran, si l'on veut une mesure exacte; de plus, on enveloppe généralement l'arc d'un globe mince de verre bien transparent; d'autre part, pour éviter les erreurs d'éclairement dues à la diffusion des radiations de l'arc *non horizontales*, par les pièces polies du photomètre ou des appareils voisins, on enveloppe la lampe d'une lanterne cylindrique K à parois noircies intérieurement au noir de fumée et pourvue de trous circulaires, *a*, *b*, *c*, pouvant être obturés à volonté et situés à des hauteurs correspondant à des angles remarquables avec l'horizon : 30°, 60°, etc. (fig. 71).

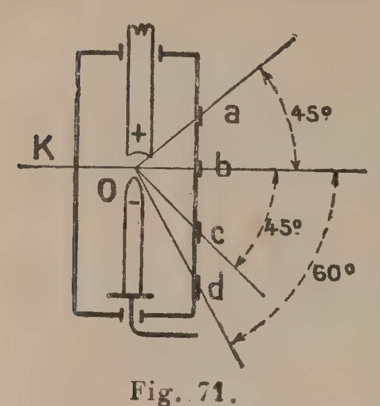


Fig. 71.

L'emploi du miroir mobile de la figure 44 est indiqué pour la mesure des *intensité* sous les *divers angles d'inclinaison*.

Il faut avoir soin de maintenir, pendant l'essai, la tension aussi constante que possible aux bornes de l'arc ; on intercale un rhéostat de réglage en série avec l'un des 2 fils reliant la lampe à la prise de courant et l'on surveille le voltmètre aux bornes, tandis que le 2e opérateur fait la mesure photométrique.

Enfin, il convient d'employer comme lampe-étalon, une lampe dont l'éclat est le plus voisin de celui de l'arc ; une lampe au tungstène est tout indiquée (surtout une lampe à atmosphère d'argon, qui est maintenue plus fixe).

B. La *distribution* de la lumière autour de l'arc s'obtient comme nous l'avons montré au § 91 (fig. 45), à l'aide de *vecteurs* représentatifs de l'intensité lumineuse sous diverses inclinaisons.

La forme de la courbe de distribution varie avec la nature des charbons et leur disposition relative.

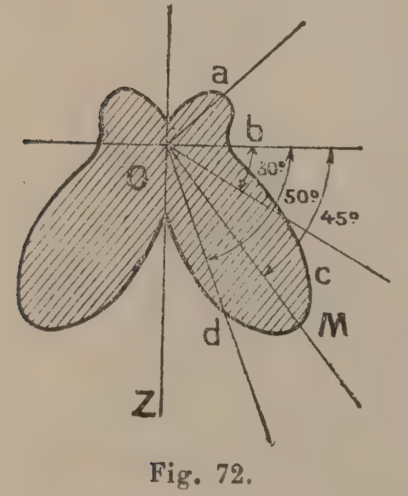


Fig. 72.

La courbe (fig. 72) correspond à un arc à charbons ordinaires ; le positif est *au-dessus* ; son cratère renvoie sous l'horizon, la plus grande partie des radiations ; l'intensité maxima est obtenue à 45° environ sous l'horizontale *Ob*.

La courbe de la figure 73 correspond à l'*arc en vase clos* (voy. plus loin) ; l'usure du charbon positif est moindre et la lumière est répartie plus régulièrement autour de l'arc, les 2 charbons ayant le *même diamètre*.

Enfin, les *charbons minéralisés* donnant un arc à flamme, dans lequel

se trouvent le carbone et les vapeurs à l'incandescence; il est assimilable en quelque sorte à un filament épais incandescent ; la distribution de la lumière rappelle celle d'une lampe à incandescence ; il n'y a plus de gorge de striction à la courbe selon l'horizontale. Le charbon positif est placé *sous* le négatif; mais alors il est nécessaire de disposer au-dessus de l'arc, un *réflecteur métallique* K (fig. 74) muni d'un trou central laissant passer la cathode, et qui se recouvre des fumées dues à la volatilisation des oxydes réfractaires formés dans l'arc par la décomposition des sels mélangés aux charbons (*fumivore* Blondel); aux radiations émises directement par l'arc : OA, OB, OC, s'ajoutent celles que réfléchit le disque recouvert d'oxydes réfractaires OX, OY, OZ, on a la courbe de la fig. 75; les vecteurs extrêmes : O*a*, O*r* représentent l'intensité lumineuse selon les directions respectives : OA (tangente au bord du disque K) et OR (limitant le cône inférieur de lumière) de la figure 74. L'intensité maxima est fournie à 30° sous l'horizon, elle est représentée par le vecteur O*m*.

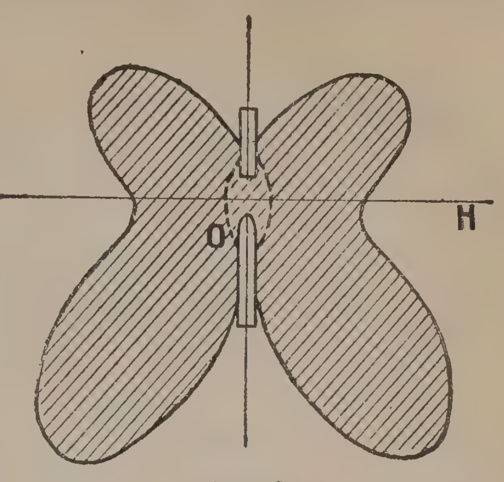


Fig. 73.

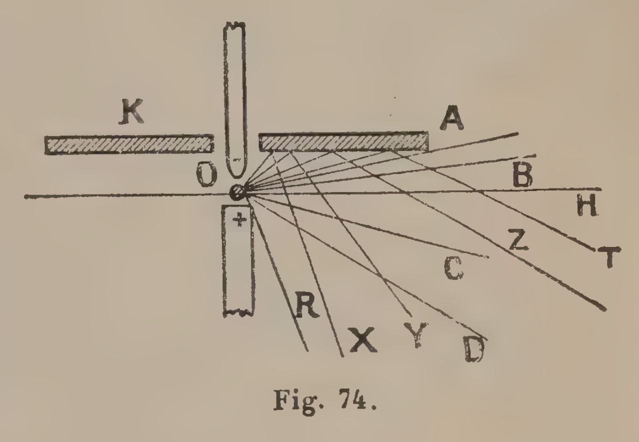


Fig. 74.

Le type de lampe essayé nous a donné :

$$L_h = 0c = 600 \text{ b. d.}; \qquad L_{30} = Om = 1\,070 \text{ b. d.};$$

à l'échelle de 1 millimètre pour 40 bougies décimales, on peut repérer aisément les autres intensités sous divers angles (lampe *Renaud-Lévêque*, à *charbons minéralisés*).

C. A l'aide de la figure de distribution de l'intensité, on construit aisément l'aire représentative du flux : AA'M'R'R, comme dans le cas d'une lampe à incandescence. (On a décrit la sphère de rayon O*m* = intensité maxima) (fig. 75).

On a, en effet, flux élémentaire *df* dans l'angle solide infinitésimal (dod_1) = intensité

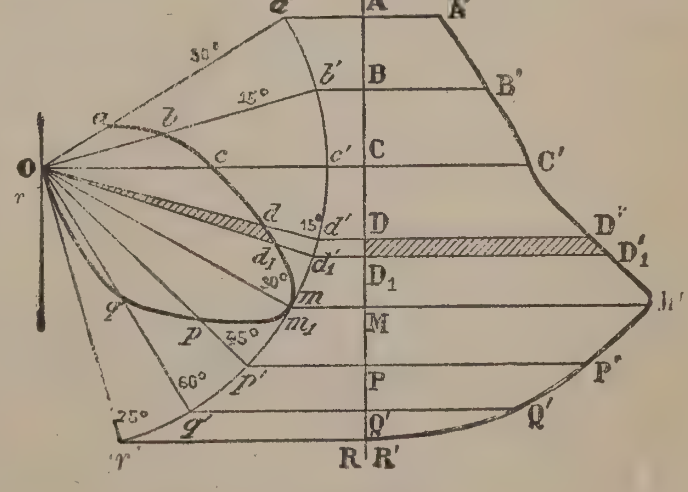


Fig. 75.

$Od \times$ surface zone traversée par le flux : $2\pi Om \times DD_1$; d'où pour le flux total à travers la surface traversée (laquelle, ici n'est pas la sphère complète, mais la zone $Oa'r'r$) :

$$F = \int df = \int Od \times 2\pi Om \times DD_1 = 2\pi Om \int Od \times DD_1 .$$

Mais : $Od \times DD_1 =$ aire élémentaire $DD_1D'_1D'$ (où l'on a par construction : $DD' = Od$) ; d'où :

$\int Od \times DD_1 = T =$ aire $AA'M'R'R$; par suite : $F = 2\pi Om \times T$.

L'intensité moyenne sphérique (1) vaudra :

$$L_s = \frac{\text{Flux total}}{\text{surface zone } Oa'r'} = \frac{2\pi Om \times T}{2\pi Om \times AR} = \frac{T}{AR} ;$$

c'est toujours la hauteur du rectangle équivalent à T, et de même base AR ; c'est-à-dire la hauteur moyenne de cette surface représentative AM'R.

En évaluant l'aire T (comme au § 91) on trouve :

$T = 6 \text{ cm}^2\, 5325$; on a d'autre part : $AR = 3 \text{ cm } 9$;

d'où :

$$\frac{T}{AR} = \frac{6,5325}{3,9} = 1 \text{ cm}. 675 ;$$

à l'échelle de 1 millimètre pour 40 bougies décimales, ou ce qui revient au même, de 400 bougies décimales par centimètre, on aura :

$$L_s = 1,675 \times 400 = 670 \text{ b.d.}$$

Le *flux* correspondant vaudra, comme il a été montré précédemment, mais en remarquant que, dans le cas présent, la surface traversée, dans la sphère de rayon 1 concentrique à la sphère de rayon Om, et correspondante à $2\pi \times Om \times AR$ (c'est-à-dire ayant même angle solide $a'Or'$) sera :

$$\sigma = \frac{2\pi \times Om \times AR}{\overline{Om}^2} = 2\pi \times \frac{AR}{Om}) :$$

$$F = \sigma L_s = 2\pi \times \frac{AR}{Om} \times 670 \textit{ lumens}.$$

Or, on a :

$AR = 3 \text{ cm}. 9$; et : $Om = \frac{1.070}{400}$ (à l'échelle déjà indiquée) $= 2,675$;

(1) Ou : *intensité moyenne globale* (Con internat. de l'Eclairage).

d'où enfin, pour le flux :

$$F = 2 \times 3{,}14 \times \frac{3{,}9}{2{,}675} \times 670 = 6.134 \text{ lumens } 7.$$

D. Étant donné le mode d'utilisation habituel des lampes à arc, qui éclairent uniquement *au-dessous de l'horizon*, et à une certaine distance des surfaces à éclairer, on évalue l'intensité moyenne *hémisphérique* L'_s, qui vaut par définition (1) :

$$L'_s = \frac{\text{flux dans l'angle solide } c'Or'}{\text{surface zone } c'r'} = \frac{2\pi Om \times T'}{2\pi Om \times CR} = \frac{T'}{CR};$$

T' étant l'aire CC'M'R'R.

La figure donne, en procédant comme précédemment : $L'_s = 790$ bougies décimales ; elle est supérieure à L_s ; il était facile de le prévoir, étant donné la *forme* de la courbe de distribution de lumière. (Voy. plus loin, d'autres graphiques obtenus avec *charbons spéciaux*).

138. **Formules empiriques.** — On peut, d'après M. Rousseau, exprimer l'intensité sphérique L_s en fonction de l'intensité horizontale L_h et de l'intensité maxima L_m, par la formule empirique :

(50) $$L_s = \frac{1}{2} L_h \times \frac{1}{4} L_m.$$

Nous avons vérifié que cette formule s'appliquait en général aux lampes *à charbons ordinaires*, à arc libre, ou *enfermé* (voy. lampe Marks).

La formule réduite :

(50') $$L_s = 0{,}35 \, L_m,$$

ne s'applique qu'à un petit nombre de cas, ceux où l'on trouve : $L_h = 0{,}2 \, L_m$ (lampes à charbons ordinaires avec le (+) au-dessus) ; elle ne s'applique donc pas aux lampes *carbo-minérales*.

M. Palaz a donné pour l'intensité maxima L_m (en bougies décimales), d'un arc sous 40 à 50 volts (charbons durs ordinaires), la formule suivante où I est en ampères :

(51) $$L_m = 200 \, I + 4 \, I^2 ;$$

on a, dans ce cas, $L_h = 0{,}2 \, L_m$.

139. *f*) **Consommation spécifique.** — On la rapporte : ou à l'intensité moyenne sphérique, ou à l'intensité moyenne hémisphériquee ; cette dernière semble plus rationnelle, puisque la lumière est distribuée

---

(1) Ou : *intensité moyenne subhorizontale* (Con internat. de l'Eclairage).

surtout au-dessous de l'horizon du foyer lumineux ; mais, pour établir la comparaison avec le même coefficient dans les lampes à incandescence, on convient de l'exprimer par rapport à l'intensité sphérique.

La *puissance* qui entre dans le calcul est la puissance totale dépensée pour *l'entretien* de la lampe, soit : P = EI watts. Contrairement à ce qui a lieu dans les lampes à incandescence, où toute la puissance est consommée en *effet-joule* par le filament, ici il y a *perte de puissance* ; c'est-à-dire que la puissance absorbée par le régulateur ne se transforme pas en *chaleur utile*. Néanmoins, il convient de rapporter la dépense à la *puissance totale*, toujours par comparaison avec la lampe à incandescence ; car c'est, somme toute, la puissance EI watts qui est fournie à la lampe pour qu'elle donne l'intensité sphérique L_s. La consommation spécifique est donc : $\frac{P}{L_s}$. Nous donnerons sa valeur avec les types de lampes usuels.

140. *g*) **Durée d'une lampe.** — Elle est limitée par celle des charbons et par le bon entretien du régulateur.

Pour les *charbons ordinaires*, l'usure horaire totale est de 5 centimètres au maximum ; le charbon (+) s'usant 2 fois plus que le charbon (—) ; en donnant un plus grand diamètre au premier (1 fois et demie celui du deuxième par exemple), on obtient une usure égale.

Pour les *charbons minéralisés*, le charbon (+) s'use 1 fois et demie plus que le charbon négatif ; l'usure horaire totale atteint 35 à 40 millimètres ; dans les arcs à fumivore Blondel, où le positif est au-dessous de l'arc, le charbon négatif s'use plus que le positif, quand il est *à mèche* (voy. plus loin) ; l'usure horaire atteint alors : 32 à 44 millimètres, dont 1 fois un quart ou une 1 fois et demie plus pour le charbon négatif (à mèche).

N.B. — L'entretien d'une lampe à arc est donc *coûteux* et nécessite un examen de tous les jours, pour le remplacement des charbons et la vérification du régulateur.

Sauf dans quelques cas, où un éclairage intensif est nécessaire pour de grands espaces et se fait avec l'arc (*phares* ou *projections*, principalement ; halls de gares ou d'usines), la lampe à filament métallique tend à remplacer complètement la lampe à arc ; on en fait d'ailleurs pour de grandes intensités lumineuses (de 1.000 à 3.000 b. d.) et leur entretien est presque nul ; le remplacement des grosses lampes ne se faisant, sauf accident, que toutes les 1.000 heures.

141. *h*) **Construction des lampes.** — Les lampes diffèrent entre elles : 1° par la nature et la forme des *charbons* ; 2° par la forme et le fonctionnement des *régulateurs*.

1° Charbons. — α) Les *charbons ordinaires* se font à l'aide d'une pâte de poussière de charbon de cornue, bien triée, et de goudron lourd de

houille; on la coule en cylindres dans des moules en fer ou en nickel et on la comprime à 250 kilogrammes par centimètre carré; on recuit les cylindres obtenus dans des creusets d'argile réfractaire, vers 1.600°. On peut remplacer le charbon de cornue par le résidu sec de la distillation des huiles lourdes de pétrole; ce résidu est très homogène et donne des cylindres plus tendres.

β) Les *charbons à mèches* sont obtenus en coulant la pâte ordinaire dans des moules à *axe plein*; on obtient des cylindres (ou baguettes) creux, que l'on recuit comme précédemment; puis on coule, dans le creux de la baguette, une pâte plus tendre (mélange de charbon tendre, de bois, par exemple, en poudre, avec des goudrons); on recuit faiblement pour ne pas durcir l'âme de la baguette. Un tel charbon se creusera plus vite dans l'âme que dans l'enveloppe, en offrant un cratère régulier: le charbon à mèche sera en (+) dans les arcs à charbons ordinaires et *au-dessus* de l'arc; dans les arcs à fumivore et à charbons minéralisés, il sera disposé en (—) et *au-dessus*, encore, de l'arc.

γ) Les *charbons minéralisés* sont obtenus en additionnant, aux pâtes précédentes, des sels minéraux qui augmentent le *rendement lumineux* de l'arc.

Le métal du sel détermine la teinte de l'arc: violacée avec les borate et silicate de potassium; jaune avec ceux de sodium; verte ou rougeâtre avec ceux de baryum ou de strontium; on ajoute comme base le spath fluor, matière principale de la minéralisation; la masse totale de ces sels représente les 15 % de la pâte de charbon ordinaire.

Dans les charbons *homogènes*, le mélange des sels à la pâte est intime; M. Bremer a réalisé les baguettes en pâte de charbon avec mèche en pâte minéralisée; — ou encore, on fabrique les charbons *hétérogènes*, constitués par une pâte minéralisée homogène avec une simple enveloppe en charbon pur (M. Blondel); ces derniers évitent la grande quantité de scories que donnent les premiers. Les charbons Bremer (*c*, *c*) sont disposés l'un près de l'autre, en forme de V (fig. 76), les pointes en bas, pour l'écoulement des scories (arc à flamme des lampes *Bremer*, *Excello*); les charbons Blondel sont disposés l'un au-dessus et dans le prolongement de l'autre (lampes carbo-minérales); quand l'anode est en bas (avec le réflecteur fumivore au-dessus de l'arc), la cathode est faiblement minéralisée et l'anode reçoit peu de scories, les poussières de celle-ci se projetant sur le fumivore.

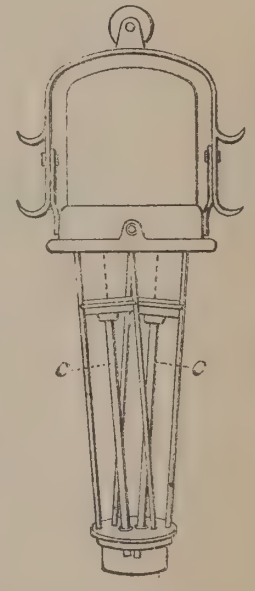


Fig. 76.

Les arcs à flammes ont de 15 à 16 millimètres de longueur; ils sont obtenus avec charbons minéralisés aux sels alcalins. Enfin, une mince

enveloppe de cuivre donne aux charbons une meilleure conductibilité et empêche leur désagrégation.

N.B. — Il est facile de comprendre, d'après ce qui précède, que la lumière de l'arc Bremer est tout entière distribuée *au-dessous* de l'horizon de l'arc, qui est disposé comme le filament d'une lampe Nernst; dès lors la courbe de lumière est analogue à celle de ce dernier filament avec *une pointe* accusée sur la verticale, puisque l'arc est nécessairement infléchi vers le bas (fig. 76 bis, A).

Au contraire, l'arc Blondel donne une distribution analogue à celle de la figure 75 mais avec 2 pointes, car il y a 2 maxima, l'un à 30° au-dessous, l'autre à 60° (en réalité il y a 2 arcs, l'un entre le positif et la mèche de la cathode, l'autre entre le positif et l'enveloppe, d'où 2 courbes inégalement disposées qui empiètent l'une sur l'autre (fig. 76 bis, B).

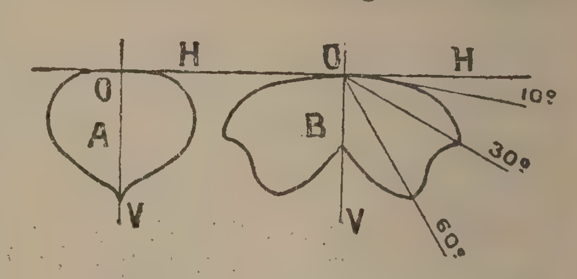


Fig. 76 *bis*.

δ) Les *électrodes métalliques* durent plus longtemps et donnent une belle lumière; mais l'arc est instable; on emploie des électrodes en ferro-titane (tension nécessaire : 48 à 50 volts); mais il faudrait un *allumeur* et une cheminée pour entraîner les vapeurs d'oxydes; on les emploie peu.

Les *électrodes en oxydes* ne s'usent pas, mais elles sont difficiles à allumer; on emploie une anode en ferro-titane et une cathode en magnétite mélangée d'oxyde de titane qui rend l'arc lumineux. (Voy. §152).

142. 2° **Régulateurs**. — Il existe 2 catégories de régulateurs : A. Les *régulateurs-série* ou *monophotes* (un seul sur *une dérivation* des courants); B. Les *régulateurs-polyphotes* (en *shunt* sur l'arc; ou en *différentiel*, c'est-à-dire composé de 2 régulateurs simples, l'un série, l'autre shunt), qui s'emploient par 2 ou 3 en série sur une dérivation de la distribution. Nous avons indiqué le but et le principe d'un régulateur : maintenir la longueur d'arc constante, quelle que soit l'usure des charbons, pour maintenir l'intensité lumineuse fixe; ils sont automatiquement commandés par le courant de l'arc lui-même.

Notons immédiatement, qu'un régulateur donné peut évidemment fonctionner avec charbons ordinaires ou charbons minéralisés.

Nous allons les décrire, en même temps que les types de lampes les plus usuels qui les emploient, en ne choisissant qu'un nombre restreint de ces types parmi les meilleurs, l'importance des lampes à arc ayant beaucoup diminué pour la raison indiquée déjà.

ι) Types de lampes à arc modernes

143. A. **Lampe monophote Marks** (à arc enfermé). — Les charbons sont entourés, à leurs extrémités voisines, par un globe de verre (clair

ou opalin) *c* (fig. 77) de forme ovoïde, où demeurent enfermés pendant quelques secondes les produit gazeux de la combustion et les vapeurs (Az, CO^2,H^2O,SiO^2); ceci, grâce à un obturateur métallique *e* posé sans jeu, par son rebord supérieur sur le bord du globe *c*; le charbon (+) glisse à frottement doux à travers cet obturateur; les 2 charbons sont de même diamètre.

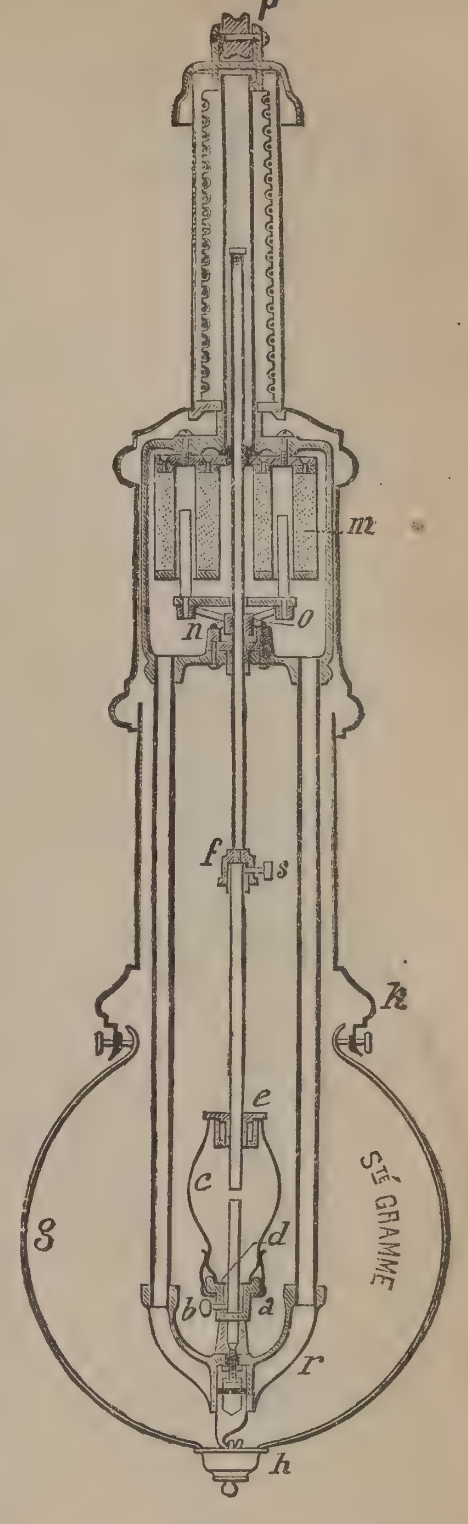


Fig. 77.

Le globe est vissé, par sa monture inférieure *d*, sur la pièce métallique *a* qui maintient le charbon négatif (très court); une vis *b* serre le charbon dans la pièce *a*.

Le charbon (+) est serré par une vis *g*, dans la monture métallique *f* de la partie inférieure d'une tige de laiton qui est saisie plus haut par 2 mâchoires croisées *n*, *o*, au bout de 2 noyaux de fer doux, plongeant à l'intérieur de 2 solénoïdes *m*, reliés *en série* entre eux et avec l'arc (c'est le *régulateur-série*). Cette lampe est construite par la *Société Gramme*.

Au début, les charbons (de même diamètre) sont au contact; le courant lancé dans la lampe, crée un flux dans les bobines du régulateur, les noyaux sont aspirés et montent; les leviers *n*, *o*, forment un angle plus aigu et les mâchoires se resserrent, le charbon (+) est saisi et monte : l'arc s'allume. Quand l'usure a agrandi l'intervalle entre les extrémités des charbons, en accroissant la résistance de l'arc, le courant diminue, ainsi que le flux dans les bobines; les noyaux redescendent, les mâchoires se desserrent, le charbon (+) redescend un peu : l'arc reprend sa longueur normale.

Les gaz enfermés dans l'ampoule *c*, s'échauffant au contact direct de l'arc, acquièrent au bout de quelques secondes, une force élastique capable de soulever l'obturateur, ils s'échappent en partie et de l'air rentre. On a ainsi des alternatives de fonctionnement à incandescence (l'arc étant entouré de gaz incombustibles) et à combustion (quand l'air rentre); la lumière n'est donc pas fixe. La figure 78 montre l'ensemble de cette lampe.

L'arc a 8 millimètres, avec I = 3 à 5 ampères, et : E = 80 volts; il faut donc, sur une dérivation à 110 volts, une résistance additionnelle et en série avec la lampe, capable de fournir une chute de tension de 30

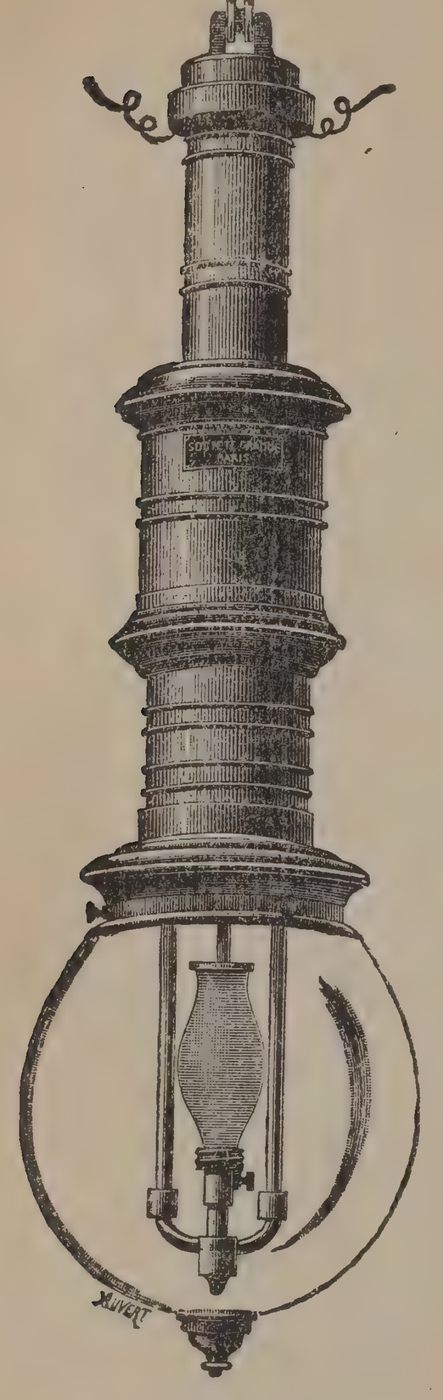


Fig. 78.

volts; elle vaudra donc entre $\frac{30}{3} = 10$ ohms, et $\frac{30}{5} = 6$ ohms, selon l'intensité du courant.

Usure horaire des charbons (3mm. au total; 2 pour le (+), et 1 pour (—)); le positif se creuse à peine. La distribution de la lumière est représentée par la figure 73.

Essai d'une lampe. — Nous avons trouvé :

$$E = 86 \text{ volts}; \qquad I = 4 \text{ ampères};$$

d'où :

$$P = EI = 86 \times 4 = 344 \text{ watts}.$$

Et : $L_s = 800$ b. d.; d'où pour la consommation spécifique :

$$\frac{P}{L_s} = \frac{344}{800} = 0 \text{ watt } 43;$$

elle est 1,5 fois plus grande que celle des lampes carbo-minérales; et 1 fois et demie moindre que celle des lampes à charbons ordinaires.

144. **Lampe Marks (carbo-minérale).** — On dispose, de chaque côté du globe, 2 tubes métalliques communiquant avec un tube central transparent, placé autour de l'arc dans le globe et ramassant les poussières d'oxydes qui vont se condenser dans les tubes extérieurs.

Le charbon (+) est à section étoilée, il est au-dessous; le charbon négatif, au-dessus.

Remarques. — La lampe *Jandus* appartient à la même catégorie de lampes; elle possède des pistons à air constituant un frein d'amortissement des déplacements brusques du charbon mobile.

N. B. — L'adjonction de tubes-cheminée atténue l'intensité lumineuse de cette lampe, dont l'intérêt a considérablement diminué, cela se conçoit.

145. B. **Lampes polyphotes.** — Elles utilisent mieux le courant d'une distribution, parce qu'elles fonctionnent par 2 ou 3 en série sur chaque

dérivation. Il ne faut pas songer à les munir d'un régulateur-série ; en effet, si r est la résistance de la première lampe et r' celle de la deuxième (cas d'un régulateur-série), il pourrait se présenter le cas où, la première lampe fonctionnant mal (arc trop résistant, c'est-à-dire trop long) sa résistance r, trop grande, soit compensée par celle r' trop faible de la deuxième (où l'arc, trop court, donnerait une intensité plus grande) et $(r + r')$ étant constant, l'intensité du courant serait elle-même constante et le fonctionnement défectueux des arcs pourrait être maintenu assez longtemps.

Il est donc nécessaire de munir les arcs, disposés en série, d'un régulateur assez bien conditionné pour le maintien de chaque arc à sa longueur constante.

La solution est obtenue avec un *régulateur-shunt* ou un *régulateur différentiel.*

La figure 79 montre la disposition d'un *régulateur-shunt*; la bobine d'électro du régulateur (S) est en dérivation sur l'arc lui-même; le charbon (+) est porté par une crémaillère K commandée par un pignon denté R, monté sur un axe solidairement avec un pignon r de plus petit rayon, qui commande une crémaillère H portant un noyau plongeur de fer doux a, de forme conique; à l'aide d'un ressort antagoniste, la masse Ha qui l'emporte légèrement sur la masse KP, est maintenue de façon que, au repos, les charbons P et N soient légèrement écartés. Si on lance un courant dans la lampe, le flux dû au courant dérivé en S, aspire le noyau a qui s'élève, et le mouvement obtenu fait descendre le charbon P au-devant du charbon N fixe : l'arc s'allume. Quand cet arc s'allonge par l'usure, P remonte légèrement et a descend; mais alors le courant dérivé en S augmente d'intensité (la résistance croissant en P, N), le flux augmente et le noyau, aspiré, remonte en rapprochant P de N. Mais un tel régulateur est d'un réglage difficile et instable. On tend à l'abandonner. Les lampes modernes sont toutes pourvue d'un *régulateur différentiel*; nous allons décrire les types de lampes les plus en faveur actuellement.

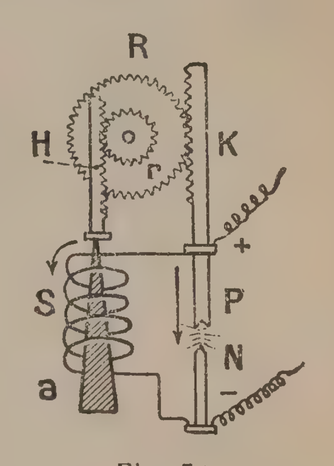


Fig. 79.

146. Lampe Bardon. — C'est une lampe à *régulateur différentiel*, dont le type moderne (fig. 80) est pourvu d'un mécanisme de précision ; ce régulateur se compose de 2 bobines : l'une S à gros fil, en série avec l'arc, entre les bornes p et n, l'autre à fil fin et résistant S′, en dérivation sur le précédent circuit, entre α et β ; ces solénoïdes agissent séparément sur deux noyaux plongeurs en fer doux C, C′, reliés par une chaîne e ou c, à un balancier AB mobile autour d'un axe K et comman-

dant, par une tige rigide, un piston R ou R′ mobile dans un cylindre à air ; les cylindres à air sont pourvus de clapets.

Le dispositif : balancier-noyaux et piston, constitue le *mécanisme* de la régulation.

Le régulateur est constitué par la poulie *r* montée sur l'axe H, avec un volant V dont elle est solidaire ; sur la gorge de la poulie passe uu cordon de soie *d*, *d′* supportant à ses deux bouts, le porte-charbon positif *a* et le porte-charbon négatif *b* ; le volant V est en friction avec un volant (V′) monté sur l'axe K du balancier et solidaire avec lui.

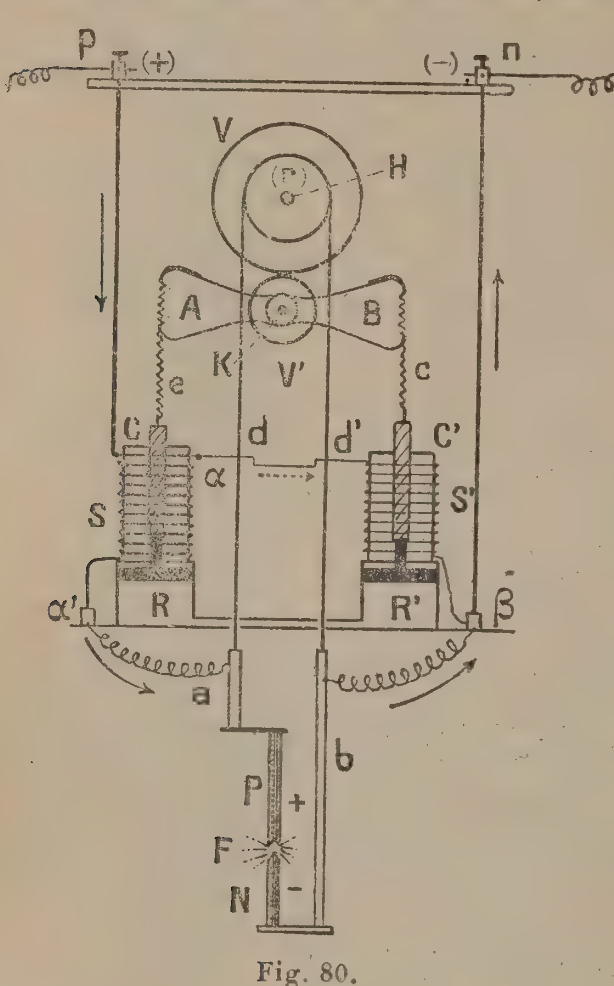


Fig. 80.

Quand la lampe est au repos, la masse du porte-charbon positif (qui l'emporte légèrement sur celle du porte-charbon négatif) tombe ; et *r* tourne, ainsi que V et V′ jusqu'à ce que les charbons P, N soient *au contact* ; l'appareil a été réglé pour que, à cet instant, le balancier soit horizontal et les noyaux partiellement engagés dans l'axe des solénoïdes, comme le montre la figure 80.

Si on lance le courant de la lampe, de *p* en *n*, le courant principal passe en S, où le flux est le plus intense : C attiré de haut en bas, fait basculer AB, tourner V′ puis V, et l'on voit aisément que P monte et N descend : *l'arc s'allume.*

Quand l'usure de l'arc aura rendu sa résistance très grande, le courant en S′ l'emportera sur le courant en S ; le flux prédominant en S′, attirera le noyau C′ de haut en bas, et le mouvement de bascule sera inverse du précédent : les charbons se rapprocheront ; dans les 2 cas, le foyer lumineux F reste fixe dans l'espace.

Les déplacements des charbons, — par suite la rotation de V, — sont toujours très faibles, à cause des *actions antagonistes* des 2 flux en S et S′ ; c'est une action différentielle qui agit sur le régulateur ; elle entre en jeu à la moindre variation de longueur d'arc. Enfin, la *réaction* de l'air comprimé en R ou R′, modère les déplacements trop brusques du balancier; car, lorsqu'un noyau est aspiré, l'air se comprime au-dessous de lui, et réagit, en même temps qu'il diminue de pression sous l'autre piston, et la pression atmosphérique réagit sur ce dernier ; on a donc des mouvements très ralentis et *apériodiques.*

On verrait, tout aussi facilement, que la moindre variation de tension sur le réseau produit le rapprochement ou l'écartement immédiat des charbons. En réunissant les cylindres R, R′ par un tube de communication, on obtient un amortissement plus puissant.

N. B. — Ce type de régulateur à mécanisme amortisseur est appliqué, avec des modifications de détails, dans un grand nombre de lampes modernes.

On emploie, actuellement, la lampe Bardon avec charbons minéralisés et fumivore Blondel.

147. **Essais.** — α) Une telle lampe carbo-minérale nous a donné, $E = 32$ volts ; $I = 6$ ampères 5 ; *intensité moyenne hémisphérique* (le fumivore limitant, par sa position très peu au-dessus de l'arc, la distribution de la lumière à l'horizon) $L'_s = 660$ b. d. (à *feu nu*); consommation spécifique : $\frac{P}{L'_s} = \frac{32 \times 6,5}{660} = 0$ watt 315 (au lieu de 0 watt 532 avec charbons ordinaires).

Un *globe opalin* donne lieu à une perte de 30 % dans l'intensité lumineuse.

Usure horaire des charbons : 31 mm. 5 (12 mm. 7 au (+) ; 18 mm. 8 au (—) ; intensité maxima à 30° sous l'horizon : 800 b. d. ; le fumivore était à 1 centimètre au-dessus de l'arc).

β) Une *lampe Bardon* à *courant continu* (charbons minéralisés convergents ; globe légèrement opalin), a fourni un diagramme du flux analogue à celui de la figure 75, mais avec intensité lumineuse maxima à 50° sous l'horizon. L'essai a donné :

$E = 46^v,5$; $I = 10^a,4$; $P = 483$ watts (dans la lampe); intensité moyenne sphérique $L_s = 1575$ bougies décimales; intensité moyenne hémisphérique; 2370 b. d. ; flux lumieux total : 19.800 lumens ; usure horaire des 2 charbons (*à mèches*) : 7 cm. 2; consommation spécifique :

$$w = \frac{P}{L_s} = 0 \text{ watt } 307.$$

Cette lampe convient pour l'éclairage des squares, places publiques, boulevards.

γ) La *lampe Renaud-Lévêque*, analogue, (étudiée au § 137 C et D) donne par bougie hémisphérique moyenne, une consommation plus faible encore : 0 watt 251 ; on a : $E = 32$ volts ; $I = 6$ ampères 2.

$$P = 32 \times 6,2 = 198 \text{ watts } 40 ; \; L'_s = 790 \text{ b.d.} ;$$

consommation spécifique : $\frac{198,4}{790} = 0$ watt 251 ; usure horaire totale : 44 millimètres (les charbons étaient à mèche, et plus tendres que ceux de la lampe Bardon).

148. **Inconvénient de l'arc à flamme.** — Le dépôt des vapeurs d'oxydes sur le globe clair qui entoure l'arc, rend ce globe opaque ; la présence du fluor. dans les matières minérales des charbons, explique le dépolissage du globe, et dès lors les produits de vaporisation s'incrustent dans la paroi de ce globe. La consommation spécifique, de ce fait (par suite de la réduction de l'intensité lumineuse), se voit augmenter dans la proportion de 70 à 100 (perte de 30 % de l'intensité lumineuse) ; elle devient ainsi (type Bardon par exemple) :

$$0{,}315 \times \frac{100}{70} = 0 \text{ watt}45\,; \qquad \text{soit } \frac{10}{7} \text{ fois plus grande.}$$

149. **Lampes de projection.** — On les règle à la main ; les charbons sont disposés de façon à diriger, sur la lentille, les radiations d'intensité maxima ; ils doivent donc être inclinés ; le meilleur dispositif à leur donner est celui des charbons Bremer (en V), placés horizontalement ; l'un des charbons est fixe, l'autre se déplace à la main, à l'aide d'une manette isolante, l'observateur ayant l'œil sur l'éclairement de l'écran ; le foyer lumineux étant disposé au foyer de la lentille, on obtient un faisceau de lumière cylindrique.

Dans les *phares*, les charbons sont disposés de façon analogue, mais pourvus de régulateur différentiel.

N.B. — Les *Etablissements Bardon* étudient actuellement (mai 1924), un type de lampe dans lequel la durée des charbons atteindra 250 heures (type Ville de Paris).

150. **Lampes Sautter-Harlé.** — La maison Sautter et Harlé fabrique actuellement 3 lampes puissantes à arc.

α) Un type de 300 ampères, destiné à illuminer l'aérophare du Mont-Valérien ;

β) Un type de 150 ampères, à anode (charbon) rotative; la tension de l'arc est maintenue constante grâce à un mouvement propre de la cathode (charbon); cette lampe était utilisée autrefois au phare de La Hève ;

γ) Une *lampe à arc Gar[illegible]ini* (rotative), pour le cinématographe; elle se compose d'un seul charbon de faible diamètre (anode), disposé suivant l'axe d'une couronne de laiton refroidie par un courant d'eau (cathode); l'arc qui s'établit entre l'anode et la couronne-cathode est rendu rotatif sous l'action d'un champ magnétique ; il en résulte que toute la face avant du charbon atteint un éclat très intense.

δ) Une lampe à arc à *charbons tournants* (ce qui maintient la fixité de l'arc) pourvue d'un réflecteur parabolique de 90 c/m de diamètre; et qui constitue un *projecteur de guerre*.

151. C. **Lampe à arc** (*au tungstène*). — Cette lampe, qui est encore soumise à des essais devant la perfectionner, est munie de 2 électrodes

en *tungstène* (1), dans une ampoule remplie d'argon et d'azote (ressemblant à celle d'une lampe à incandescence au tungstène, mais *plus petite à intensité lumineuse égale*). La distance des électrodes est fixe ; il n'y a *pas de régulateur*. Un fil, voisin des électrodes et en dérivation sur elles, reçoit le *courant d'amorçage* : il devient incandescent (rouge-sombre) et *ionise* le gaz ambiant : l'arc jaillit entre lui et les électrodes ; le fil allumeur est alors mis *hors circuit*, et l'arc s'établit entre les électrodes. Les petits globules de tungstène *fondu*, qui constituent un véritable *foyer ponctuel* (et dont le diamètre est de l'ordre de 2 à 3 m/m) émettent toute la lumière produite ou à peu près; son éclat est de 1500 à 1600 bougies-centim. carré. Les dimensions restreintes du foyer lumineux expliquent la réduction des dimensions de l'ampoule.

On construit ces lampes de 500 à 1000 bougies, avec une consommation spécifique identique à celle des lampes à incandescence en atmosphère gazeuse : on espère réduire encore cette consommation. (*Société Philips.*)

152. D. **Lampe à arc à magnétite.** — L'anode (placée au-dessus de l'arc) est en cuivre ; la cathode, située au dessous, est un mélange de magnétite (oxyde Fe^3O^4) avec des oxydes de chrome Cr^2O^3 et de titane TiO, enveloppé d'un tube cylindrique de fer. L'anode ne s'use pas ; la cathode, s'use lentement. L'arc, assez long (2 à 3 c/m) donne un spectre de bandes vertes et rouges (couleurs complémentaires), donc une *lumière blanche*. La consommation spécifique est voisine de 1/2 watt-bougie décimale; elle ne fonctionne qu'en *courant continu* (l'anode cuivre ne pouvant servir de cathode, ni la magnétite d'anode). Cet arc est surtout *luminescent*, avec un éclat voisin de 600 b. centim. carré (Ives et Luckiesch).

153. E. **Lampes à arc en courant alternatif.** — α) Tous les types de lampes qui précèdent peuvent être utilisés en *courant alternatif*, à condition d'adjoindre au régulateur de la lampe (si la fréquence est < 50) une bobine de *self-induction*, qui atténue par la force électromotrice qu'elle crée quand le courant finit ou recommence dans la lampe (par suite de l'alternance des phases) la diminution d'éclat.

Cette bobine de self est à *impédance* variable R_i, telle que :

(52) $R_i = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ (ω = pulsation des courants alternatifs ; R, résistance ohmique de la bobine ; L, son coefficient de self en henrys ; ce dernier dépend du noyau de fer doux qui traverse son axe) ; si la bobine est assez longue par rapport à son diamètre, on a : $L = \frac{4\pi n^2 s\mu}{10^9 l}$ henrys ; (n = nombre de spires ; s = section droite ; μ =

(1) Terminées par deux petites sphères de tungstène de 2 à 3 m/m de diamètre.

coefficient de perméabilité du noyau de fer doux; $l =$ longueur de la bobine selon son axe; c'est aussi celle du noyau). En déplaçant le noyau dans la bobine, on obtient des variations de L, donc de R_i; donc on peut *régler le courant* allant à la bobine, et au régulateur en *série* avec elle. (Voy. plus loin, § 157 β.)

On atténue de la sorte les vibrations lumineuses qui accompagnent les courants alternatifs, et influent sur la fixité de l'arc. Au-dessous de la fréquence 40, les vibrations sont insupportables sans la bobine de self; à la fréquence 50, elles sont tellement atténuées, que la bobine de self devient *inutile.*

Chaque bobine est construite pour la fréquence f des courants que l'on utilise dans la lampe $\left(f = \frac{\omega}{2\pi}\right)$, et pour l'intensité I (amp.) de ces courants, de façon à connaître la *perte de charge* : $R_i \times I$ qu'elle introduit dans le circuit de la lampe, et dont il faut tenir compte dans le calcul de celle-ci. (rev. § 134, et voir § 157.)

β) De plus, dans les lampes pour courants alternatifs, il y a aussi à considérer un *facteur de puissance*, qui réduit la puissance absorbée par la lampe, laquelle est *inférieure* à EI (E = tension aux *bornes*; I — intensité du courant d'alimentation). Ce facteur de puissance est égal à 0,80 en moyenne dans les lampes à *charbons minéralisés*; de sorte que, pour obtenir une puissance correspondant à l'entretien du *même arc* qu'en courant continu (même intensité lumineuse), et bien que la *tension électrique* nécessaire à l'entretien de l'arc seul soit toujours *inférieure* (28^v à 30^v, au lieu de 32^v à 35^v, avec *charbons minéralisés* et *arc à flamme*) à celle qu'exige le courant continu, la puissance à fournir avec bornes de la lampe sera *plus grande*, et la consommation spécifique *plus grande par conséquent* (1 fois $\frac{1}{4}$ plus grande, en moyenne). Si K est ce *facteur de puissance*, l'on a pour la puissance consommée dans la lampe : $P = KEI < EI$. — L'usure horaire des charbons est *un peu plus faible* qu'en courant continu; le diamètre est sensiblement le *même* pour les 2 électrodes.

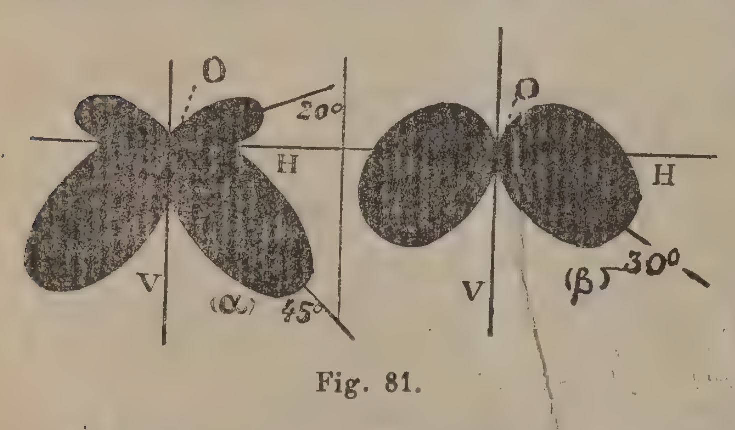


Fig. 81.

γ) La *distribution de la lumière* autour de l'arc est différente de celle que l'on obtient avec le courant continu : ce qui s'explique par l'alternance de polarité des 2 électrodes, dont chacune est tour à tour positive et négative (pendant une demi-période).

Un même type de lampe, à charbons durs (lampe *Bardon*) qui donne

le diagramme de distribution du flux α (fig. 81) en courant continu, fournit le diagramme β (même figure), — analogue à celui des arcs à charbons minéralisés en courant continu ; — la lumière est plus également répartie autour de l'arc, meilleur dans le sens horizontal, et le maximum a lieu vers 30° sous l'horizon (au lieu de 40° à 45° en courant continu).

154. δ) Les fig. 82 et 83 montrent, respectivement, une *lampe Bardon* pour courant alternatif, et sa *bobine de self* séparée, avec dispositif de réglage. Elle se construit pour toutes les fréquences (35 à 50), avec courant d'alimentation de 5 à 15 ampères. Le tableau suivant résume les *essais* d'une lampe Bardon pour *courants alternatifs* (par le Laboratoire Central d'Electricité, en 1912) ; type : 8 amp. 43 volts ; 50 périodes. La lampe était montée en série avec une bobine de self. Les charbons avaient : le supérieur, 18 mm. de diamètre ; l'inférieur, 16 mm. ; *usure horaire* moyenne : 2 mm. 4 pour le charbon supérieur ; 2 mm. 7 (charbon inférieur), ces charbons étaient *minéralisés*, et superposés. *Tension aux bornes* : 43 volts 2 (efficaces) ; *intensité* : 8 ampères 1 (efficaces) ; *puissance totale dépensée* : P = 280 watts (*au wattmètre*) ; *facteur de puissance* $K = \frac{280}{43{,}2 \times 8{,}1} = \frac{280}{350} = 0{,}80.$ *Intensité lumineuse moyenne hémisphérique* (déduite du diagramme de la fig. 84, comme nous l'avons montré au § 137, pour un arc à courant continu) : 968 bougies décimales ; *flux lumineux hémisphérique inférieur* : 6.080 lumens ; *flux lumineux total* : 6.740 lumens. Consommation spécifique *utile* (c'est-à-dire par bougie décimale hémisphérique) : $\frac{280 \text{ w}}{968} = 0$ watt 29.



Fig. 82.

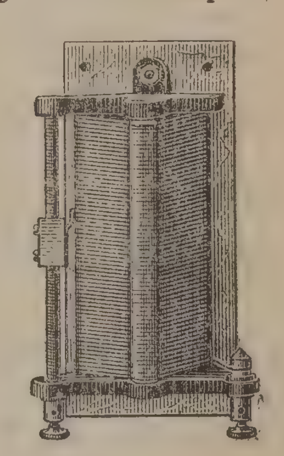


Fig. 83.

On remarque, sur la fig. 84, que le flux au-dessus de l'horizon est *très faible*, soit : $\frac{6.740 - 6.080}{6.740} = 9,79\ \%$ seulement du flux total.

Le diagramme du flux lumineux avec *charbons minéralisés*, est différent de celui (fig. 81, β) que donnent les *charbons durs* ; presque toute

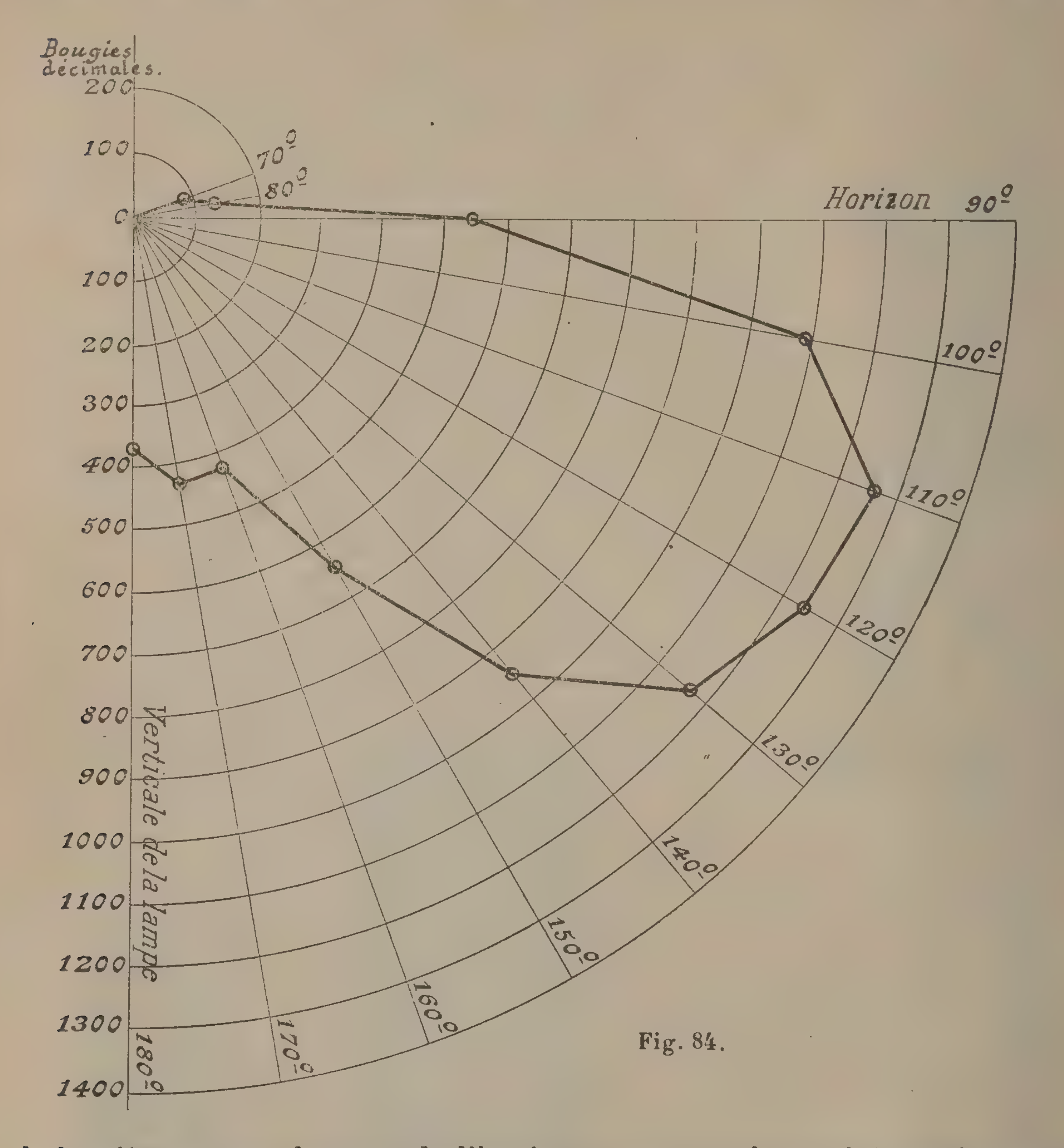


Fig. 84.

la lumière est au-dessous de l'horizon, avec une intensité maxima à 20° sous cet horizon ; l'intensité horizontale est *moindre*, et l'intensité verticale plus grande que dans le cas précédent.

ε) Un autre type de lampe Bardon (à charbons minéralisés à mèches, et convergents) a fourni une distribution du flux lumineux entièrement sous l'horizon (grâce à un *diffuseur* en forme de calotte sphérique); son essai a donné (courant alternatif de fréquence 50) :

Usure horaire des charbons : 10 mm. 6 ; I = 10,5 (efficaces) ; E = 43,5 (efficaces) ; P = 392 watts ; facteur de puissance : K = 0,86 ; L_s = 1050 b.d. ; L_s' (hémisphérique, la seule intéressante ici) = 2000 b. d. ; F (total)

= 13.250 lumens; consommation spécifique (par bougie décimale hémisphérique) = w_1 = 0 watt 196 (la plus faible obtenue jusqu'à présent); intensité L maxima = 3600 b.d., à 80° sous l'horizon. Cette lampe convient à l'éclairage des places, des jardins publics, des halls de chemins de fer, des ateliers de grosse mécanique.

155. F. **Applications des lampes à arc.** — Les lampes à arc reçoivent actuellement les applications suivantes :

1° à l'*éclairage électrique*, lorsqu'on a besoin de foyers puissants, et pour un éclairage d'ensemble (halls, places publiques, boulevards);

2° dans la *Radiotélégraphie*, pour l'émission d'ondes entretenues ;

3° pour les *projections* à longue distance (*phares*; navires de guerre; champs d'aviation); et les *projections cinématographiques* ;

4° pour le tirage des *bleus* et la *photogravure*; — examinons ces diverses applications.

156. **1° Eclairage par arc.** — Toutes les lampes à arc sont enveloppées, avons-nous dit, d'un *globe opalin* destiné à atténuer l'éclat du foyer lumineux; d'ailleurs, ce globe opalin ne modifie pas la distribution de la lumière autour du filament; mais il absorbe de 20 % (globe translucide) à 30 % (globe plus opaque) de la lumière produite, ce qui diminue le rendement de la lampe.

Vu la forme des courbes de distribution du flux obtenues avec les lampes à arc, — distribution si favorable à l'utilisation de la lumière au-dessous de l'horizon, — tout *réflecteur* est rendu *inutile*. Distinguons l'utilisation des lampes à arc en courant continu ou en courant alternatif.

α) *Courant continu.* — On installe les lampes à arc de la manière suivante :

1° S'il s'agit de lampes monophotes (type Marks ou Jandus), on met en série, avec la lampe, une résistance de réglage pour utiliser la différence de tension entre le réseau et la lampe ; chacune d'elles marche indépendamment des autres ; 2° pour les lampes polyphotes, il est bon d'adjoindre à chaque lampe un *dériveur*, résistance en dérivation aux bornes qui laisse passer le courant de la série quand la lampe se détraque; on évite ainsi la détérioration du fil du régulateur, lequel recevrait tout le courant quand l'arc s'éteint par suite d'une brisure, par exemple; — dans le cas qui intéresse ce montage, la régulateur est en shunt, ou différentiel; ce serait le *fil fin* de la régulation qui serait exposé à être brûlé. — De plus, il est indispensable d'ajouter en série, à chaque groupe de lampes, une résistance additionnelle de réglage. Ainsi, avec des lampes à 32 volts par exemple, sur un réseau à 110 volts, on disposera : $\frac{110}{32} = 3$ lampes en série, donnant une chute de tension totale de : $32 \times 3 = 96$ volts : la résistance additionnelle servira à assu-

rer la chute de tension : 110 volts — 96 volts = 14 volts ; si le courant de ces 3 lampes est de 6 ampères 5 (lampe *Bardon* carbominérale), la résistance vaudra :

$$\frac{14}{6,5} = 2 \text{ ohms } 15.$$

En ce qui concerne le calcul des câbles de distribution, il se fait d'une façon analogue à celui des lampes à incandescence, connaissant l'intensité du courant destiné à chaque lampe et la *densité* de courant. Un groupe, — c'est-à-dire plusieurs séries d'arcs, — est commandé par un interrupteur général avec coupe-circuits, à la station.

Dans les installations particulières, chaque série est commandée par un interrupteur à grande intensité et les coupe-circuits sont en forme de lames de plomb.

La *disposition relative* des foyers sera étudiée au § III° (Projet d'éclairage).

157. β) *Courant alternatif*. — *a*) Chaque lampe est pourvue d'une *bobine de self* (voy. §153); il faut donc tenir compte de cette *résistance inductive*, et exprimer *la tension réelle* aux bornes de chaque lampe, pour comprendre comment on distribue un groupe de lampes sur un réseau de dérivation (entre les câbles de distribution). M. A. Blondel a montré que, bien que l'intensité I et la f. é. m. E′ de l'*arc même* soient *en phase*, la *puissance dépensée* pour l'entretien de l'arc seul est $< E'I$ (ceci résulte de ce que les ondes de I et de E′ sont de *formes différentes*, comme le fait voir leur relevé à l'*oscillographe*) ; la puissance dépensée dans l'arc seul est donc : $kE'I$; k étant un *facteur de puissance* qui varie de 0,90 à 0,98 avec des *charbons minéralisés purs* ; il est plus faible avec des charbons durs ordinaires. Il faut ajouter, à cette puissance, celle qui est absorbée par le *régulateur* (résistance : r) et la *bobine de self* en série avec la précédente (résistance : R ; voy. § 153) : ensemble : $(r + R)I^2$; à cause de ces bobines (régulateur et self de réglage) il y aura *décalage* du courant d'alimentation I sur la tension E *aux bornes de la lampe* ; avec un facteur de puissance d'ensemble K, la puissance totale absorbée par la lampe vaudra donc :

(53) $P = KEI = kE'I + (r+R)I^2$; on mesure P au wattmètre ; E et I aux voltmètre et ampèremètre thermiques ; on en déduit K (qui vaut de 0,70 à 0,85 en général, nous l'avons dit). Cette formule (53) permet de voir combien de lampes on peut disposer sur le réseau.

b) Quand les lampes vont par 2 en tension, sur une même dérivation (lampes Bardon à 43 volts par exemple), une bobine de self unique sert au réglage des 2 lampes avec lesquelles elle est en tension ; on peut calculer d'après une formule analogue à (53), quelle sera la valeur de E, et

la *résistance supplémentaire* à ajouter aux 2 lampes, pour l'équilibre des tensions. Mais il arrive que 2 lampes en série fournissent une puissance lumineuse trop forte pour l'éclairement à obtenir. Dans ce cas où *une seule lampe* suffit, l'on emploie un petit transformateur-réducteur de tension (fig. 85); la lampe, en série avec sa bobine de self, est installée aux bornes du secondaire du transformateur (sous 40 volts, par exemple); la tension aux bornes du primaire (installé en dérivation sur la canalisation monophasée) étant par exemple de 110 volts, si la tension vaut 110ᵛ sur le réseau (on calcule le transformateur à cet effet; voy. *Traité d'électricité, tome II*; *H. Pécheux*; *Delagrave, Editeurs*).

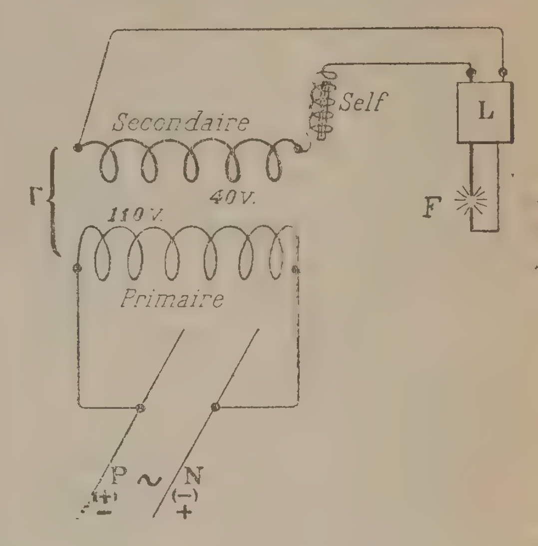


Fig. 85.

Un avantage supplémentaire résulte de ce dispositif : c'est que chaque lampe est rendue *indépendante*, et que son extinction (pour une cause quelconque, rupture de charbons, ou détérioration du régulateur) n'entraîne pas nécessairement celle des lampes voisines.

c) Quand le réseau de distribution fournit du courant *diphasé*, ou du courant *triphasé*, les lampes sont installées sur chaque *pont* du réseau (entre 2 des câbles), comme sur un réseau monophasé; il suffit de connaître *a priori* la tension entre 2 câbles.

Il existe des *modèles spéciaux* de lampes pour alimentation par les courants triphasés : ils sont formés de 3 charbons minéralisés convergents, disposés selon les arêtes d'un trièdre, chacun étant pourvu de sa bobine régulatrice reliée d'autre part à l'une des phases des courants; il s'établit, entre les 3 charbons, 3 arcs qui se forment en triangle. Si les 3 ponts du circuit ne sont pas équilibrés, ou les régulateurs des lampes mal réglés, les 3 arcs ne s'allument pas à leur tour, et la lumière est papillotante. De plus ce dispositif exige un transformateur triple et le fonctionnement est onéreux et irrégulier. Il est préférable d'employer 3 *lampes distinctes*, chacune sur un pont du circuit de distribution (comme dans la fig. 85).

158. 2° **Radiotélégraphie; radiotéléphonie** — On utilise, dans certains *postes d'émission* de T.S.F., des lampes dites : « à *arc chantant* », la fig. 86 montre un tel arc (en A), disposé sur un même circuit avec un condensateur C, une dynamo-continue à *haute tension* D, une résistance *r* (de faible self-induction), et le secondaire du transformateur T_r d'un téléphone M à pile P, et la bobine primaire *b* de self, du transformateur (*b*B) à la Tesla, servant à l'émission des ondes par une antenne

(A′). La lampe (A) est à 2 électrodes, la *positive* en charbon (anode), la négative en cuivre (cathode) refroidie intérieurement par une circulation d'eau (c'est la lampe *Garbarini*; voy. § 127); l'anode tourne sur son axe, pour donner un arc fixe; les électrodes sont entourées d'une atmosphère d'hydrogène, ou de vapeur de pétrole. L'arc est entretenu par le courant de la dynamo D à tension constante.

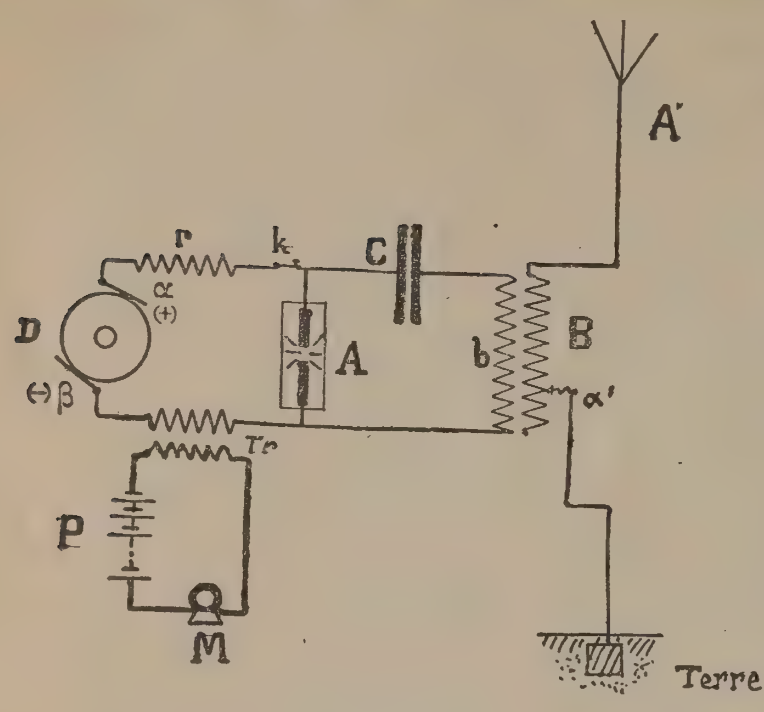


Fig. 86.

Si l'arc est *éteint*, le condensateur C se charge, et la tension E′ aux bornes de l'arc *croît*; il s'allumera pour une certaine valeur de cette tension, et le condensateur se déchargera alors dans le circuit (CA*b*), et la tension E′ baissera; si elle devient trop faible, l'arc s'éteindra; le condensateur se rechargera à nouveau, et ainsi de suite. On aura une succession rapide de charges et décharges, fournissant une courbe à amplitude constante (M. A. Blondel) : ce sont des ondes entretenues. Si la résistance de l'arc est *assez grande*, on a une décharge *sans oscillations*. Mais si la self est faible dans le circuit d'alimentation (en *r*) et l'écart des charbons bien réglé, l'arc ne s'éteindra jamais. Avec une self très grande, une tension E de la dynamo très grande, et une résistance du circuit faible, on aura des *décharges oscillantes*.

L'arc fait entendre *un son*, sous l'influence des vibrations qui se produisent (et qui sont de l'ordre musical). — Avec une tension E = 2000 volts, et un arc dans l'air comprimé à 7 atmosphères, on a une très grande fréquence d'ondes; l'antenne ne transmet que l'onde fondamentale. Avec de basses tensions (arc Poulsen, dans l'hydrogène), il faut pour éviter les extinctions de l'arc le disposer dans un champ magnétique.

159. 3° **Lampes de projections.** — *a*) On opère, dans les salles d'amphithéâtres, dans les salles de conférences, des *projections de vues, machines, coupes anatomiques* (obtenues sur clichés photographiques), à l'aide d'appareils tels que celui de la fig. 87; une lampe à arc avec régulateur I, dont l'arc se forme entre les charbons G,H, est disposée à l'intérieur d'une cheminée cylindrique noircie intérieurement, l'arc est au foyer d'une lentille convergente C; un miroir parabolique A a aussi son foyer sur l'arc; les rayons qu'il réfléchit s'ajoutent à ceux émis directe-

ment, et tous ces rayons tombent sur la lentille C; le cliché est placé près de C (à droite) et à la *distance focale* de cette lentille ; de cette façon il est fortement éclairé; on obtient sur un écran une image agrandie de celle du cliché.

b) Pour les *projections cinématographiques*, on utilise le même dispositif ; la pellicule photographique qui se déroule d'un tambour à axe horizontal vient glisser dans un chassis en (H.N.) (fig. 88), et verticalement ; cette pellicule se trouve au foyer de la lentille convergente I, associée à la lentille C (le tube AB est adapté à l'appareil de la fig. 87) ; l'on met *au point* ; ces 2 lentilles servent à éclairer fortement la pellicule en HN, grâce aux rayons de l'arc (fig. 87); on obtient sur un écran, la succession rapide des vues enregistrées par la pellicule, et qui laisse à l'œil l'impression d'un mouvement continu ; — les vues repérées se suivant à $\frac{1}{16}$ de seconde d'intervalle, et l'impression de chacune sur la rétine persiste pendant $\frac{1}{23}$ de seconde ; l'impression d'ensemble se fera sans discontinuité.

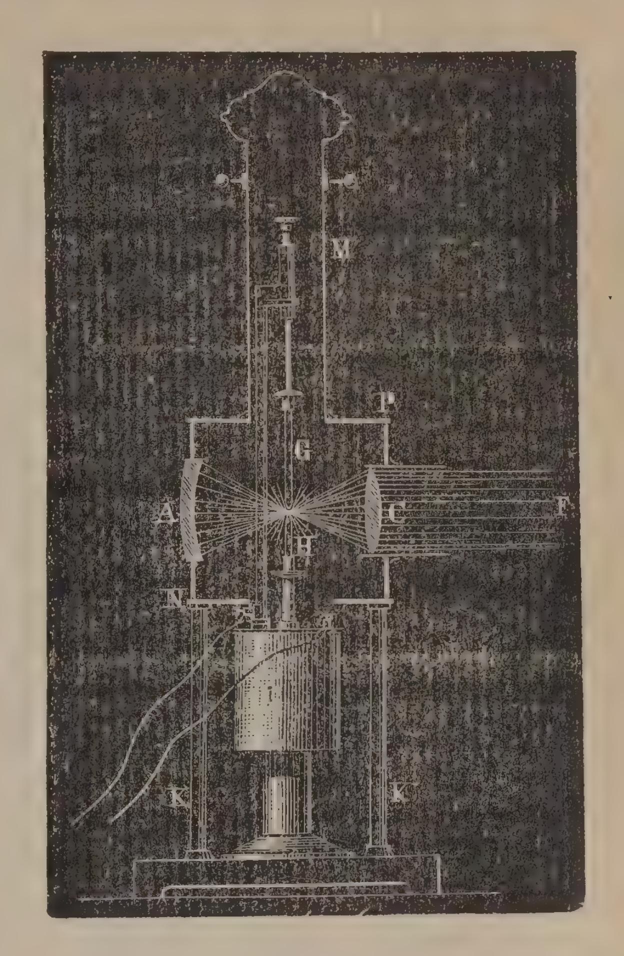


Fig. 87.

c) Les *appareils projecteurs des phares* utilisent les *lentilles de Fresnel* (dites à échelons), constituées par une lentille plan-convexe A (fig. 89) entourée d'une lentille annulaire BB, plan convexe; celle-ci l'étant d'une autre de même forme CC ; ces lentilles ont toutes leurs foyers au *même point* F, là où l'on dispose l'*arc électrique* ; on obtient un faisceau cylindrique RR, peu affaibli par l'absorption atmosphérique, et visible à *plusieurs kilomètres* ; avec des arcs de 10.000 bougies, la lumière est portée à 30 ou 40 kilomètres. Il existe 2 systèmes de lentilles, autour de l'arc, mûs tous deux d'un mouvement de rotation uniforme autour de l'axe vertical ZZ'; tous les points de l'espace sont

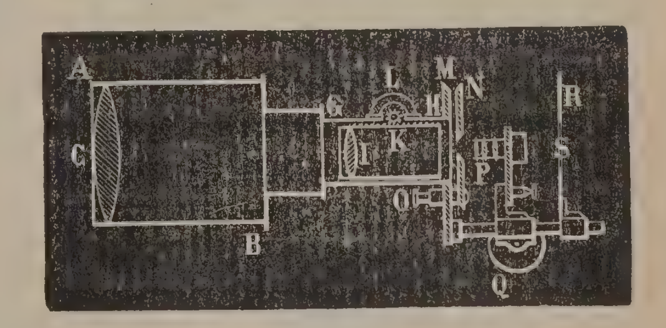


Fig. 88.

éclairés périodiquement avec *éclipses régulières* (correspondant aux intervalles entre les 2 systèmes).

d) Dans les *lampes à arc de projection* avec *courants alternatifs* on fait converger généralement les charbons sous un angle de 90° à 100°; le rendement lumineux est alors *inférieur* à celui des lampes à arc à *courant continu* : il y a des *battements* entre la fréquence des *extinctions* d'arc et celle des *images*, et l'éclat s'en trouve diminué.

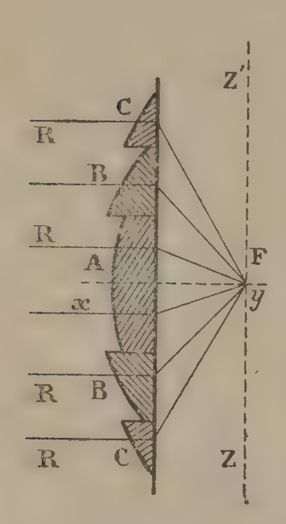


Fig. 89.

Le *dispositif récent* de *B. Schafer* donne de bons résultats; il se compose (fig. 90) d'un charbon horizontal C de gros diamètre, de 2 petits charbons verticaux $c_1 c_2$, superposés, d'une bobine de self D, et d'un rhéostat réglable S (réducteur de tension); une résistance ohmique R permet d'obtenir une différence de phases aussi grande que possible entre les 2 circuits; le rhéostat S permet de faciliter l'allumage et d'égaliser les courants dans les 2 circuits : $(\alpha C c_1 D \gamma \beta)$, et $(\alpha C c_2 R \gamma b)$; un transformateur T réducteur de tension (de 110_v à 50_v) permet, en disposant le circuit-lampe convenablement entre la borne β du secondaire, et le curseur mobile α (pour réglage de la tension), d'utiliser un réseau alternatif à 110 volts. Cette lampe donne un *foyer ponctuel*, donc des images très nettes, et l'extinction de l'arc est rendue impossible.

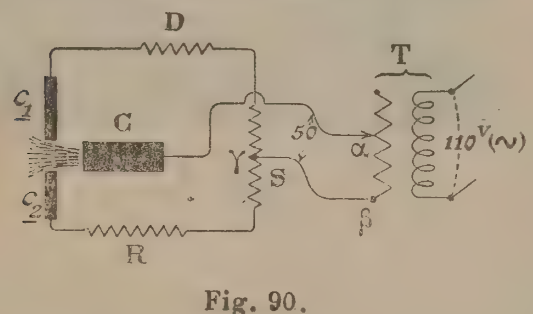


Fig. 90.

Le tableau ci-dessus donne les *intensités lumineuses* en bougies-heffners obtenues avec cette lampe à 3 charbons, et avec une lampe à 2 charbons seulement superposés, pour un même courant d'alimentation (d = diamètre des charbons; I = intens. en ampères; L_s = int. moy. sphérique) :

I	Lampe à 3 électrodes {gros charbon : $d = 20$ mm. / petits charbons : $d = 12$ mm.	Lampes à 2 électrodes ($d = 20$ mm)
32	$L_s = 1.400$	$L_s = 600$
47	$L_s = 3.400$	$L_s = 3.000$

N. B. — L'avantage est surtout sensible avec 32 ampères; il ne faut pas dépasser cette intensité.

Avec les 2 charbons, la durée de l'éclat est à peine un *peu supérieure* à celle de l'éclipse ; avec les trois charbons, les éclats dus aux 2 courants se *juxtaposent*, et l'éclipse dure à peine la $\frac{1}{6}$ partie de l'éclat

(pour une période des courants; laquelle, à la fréquence 50, dure $\frac{1}{50}$ de seconde.

160. 4° Tirage des bleus; — photogravure. — α) On peut remplacer la *lumière solaire*, — quand elle fait défaut, — par une lampe à arc de 600 à 1.000 bougies, aux radiations de laquelle on expose une feuille de papier à dessin enduite, au moyen d'un pinceau, de la solution suivante : *eau* : 20 grs; gomme : 1 gr; citrate de fer ammoniacal : 2 grs; ferricyanure de potassium (prussiate rouge) 2 grs, et séchée; la feuille ainsi préparée est recouverte d'un dessin à l'encre de Chine sur papier calque, et exposée à l'arc électrique; la lumière blanche de l'arc *réduit* le sel ferrique là où il n'est pas masqué par les traits opaques; après exposition de 10 à 15 minutes, on retire le calque, et on *lave à l'eau*; on obtient des *traits blancs* sur fond bleu (bleu de Prusse).

On obtient des *traits bleus* sur *fond blanc*, au contraire; avec un papier imprégné de sels ferriques (citrate de fer ammoniacal et chlorure ferrique), à l'aide d'une solution composée de : gomme : 3 grs 33; citrate : 2 grs; chlorure ferrique : 1 gr. 66; eau : 23 grs; on opère comme précédemment, avec le papier calque, et l'on révèle l'image en traitant par une solution de ferrocyanure de potassium à 20 %; on lave à l'eau acidulée à l'acide chlorhydrique à 10 %, à l'eau pure, et l'on sèche.

On réalise ainsi les dessins industriels, que l'on peut tirer à un grand nombre d'exemplaires, pour l'exécution des pièces de machines dans les ateliers de construction.

β) La *photogravure* se fait ainsi : on recouvre de gélatine bichromatée une plaque de cuivre ou de zinc; on pose dessus le cliché négatif du dessin à reproduire (exécuté à l'encre de Chine), et l'on soumet à la lumière de l'arc; un traitement à l'eau chaude enlève la gélatine *non touchée* par les radiations de l'arc, et laisse en relief les traits du dessin; un acide attaque ensuite le métal, et accuse les reliefs; on enlève la gélatine bichromatée (rendue *insoluble* par la lumière blanche, et qui représente les reliefs) par un dissolvant approprié; et l'on moule par les procédés galvanoplastiques ordinaires.

II° — Lampes à arc (à vapeur de mercure)

161. — Nous avons indiqué, au § 131, le principe du fonctionnement d'une lampe à arc dans la vapeur de mercure. Nous allons décrire l'ancien type de lampe Cooper-Hewitt (à amorçage à la main), le *type Steinmetz*, à amorçage *automatique* — tous deux à tube de verre —; et le *type récent Westinghouse* à tube de *quartz*.

a) **Lampe Cooper-Hewitt.** — Elle est constituée par un tube de cristal, de 1 mètre de longueur environ, pourvu d'une électrode assez longue en

fer à une extrémité et d'un peu de mercure à l'autre ; le *vide* était fait au préalable dans ce tube (à 1 ou 2 m/m) ; on relie le fer au (+) d'une prise de courant ; le mercure (à l'aide d'une électrode en *platine* soudée au verre et venant au contact du mercure) au (—) ; et l'on incline le tube pour permettre au mercure de venir au contact du fer ; le courant passant alors d'un métal à l'autre, échauffe le mercure et provoque une électrovaporisation ; en redressant ensuite le tube, un *arc* lumineux s'allume entre les électrodes, dans toute la longueur du tube, donnant une lumière bleu-verdâtre (dépourvue de radiations rouges) ; cet arc est entretenu par l'électrovaporisation à la cathode.

L'expérience montre que l'entretien de l'arc à vapeur de mercure nécessite une différence de potentiels de 1 volt par centimètre de longueur ; pour une lampe fonctionnant sous 110 volts, il faut un tube de 110 centimètres de longueur.

La pression intérieure ne dépassant pas 2 millimètres de mercure en fonctionnement, on obtient un bon rendement lumineux.

N. B. — La *Société Westinghouse* construit la lampe Cooper-Hewitt pour *courant continu* (type précédent), et pour courant alternatif : dans ce cas, elle est pourvue d'un *allumeur* (interrupteur à mercure dans une ampoule où l'on a fait le vide, et pourvu de 2 électrodes en platine au contact du mercure) ; cet allumeur est en série avec une bobine de self, placée en dérivation entre les bornes de la lampe. Quand on ferme le circuit, l'*allumeur* est *basculé* par un électro, et le courant est interrompu brusquement ; une f.é.m. de self assez forte naît alors dans la bobine auxiliaire, et s'établit entre les électrodes (en platine), et l'arc s'allume. — Elle se construit pour 110v ou 220v avec 3a5 ; longueur 1 m. 40.

Applications : A cause de la nature spéciale des radiations de la lampe, elle convient tout spécialement pour le *tirage des bleus* (voy. § 160).

162. *b*) **Lampe Steinmetz.** — Elle est à allumage automatique, c'est-à-dire qu'elle ne nécessite pas la manipulation, à la main, du tube pour l'amorçage de l'arc. A cet effet, elle se compose (fig. 91) en outre des électrodes de fer B, de mercure A, d'un électro à noyau fixe S, d'une bobine de self-induction R, d'une autre bobine S′ enroulée autour de la paroi d'une ampoule de verre V renfermant du mercure en communication avec l'extrémité A du tube et un noyau de fer doux flotteur *h* ; quand on ferme le circuit de P en N, aucun courant ne passe en S, le circuit étant interrompu entre *b* et A, tout le courant passe en KRS′ ; l'électro S′ attire le noyau *h* de haut en bas ; ce noyau plonge davantage dans le mercure, lequel passe en A où son niveau monte et vient au contact de l'extrémité *b* de l'électrode en fer ; à ce moment, le courant passe en S, aimante le noyau qui attire le marteau du contact K, et le courant est interrompu en K, le flux cesse en S′, le noyau *h* remonte, du mercure repasse de A en V et un arc jaillit entre *b* et A.

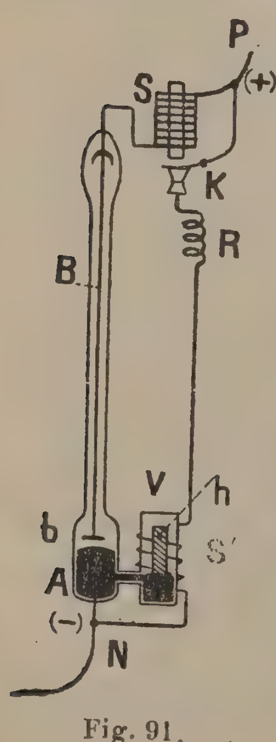


Fig. 91.

Cette lampe prend 3 ampères 1/2 sous 110 volts, en donnant 855 bougies décimales, et une consommation spécifique de

$$\frac{110 \times 3,5}{855} = 0 \text{ watt } 45.$$

La mesure de l'intensité est délicate, à causes des *radiations vertes* prédominantes de cet arc au mercure. Pour l'effectuer, on la détermine par centimètre de longueur, en recouvrant le tube d'un clinquant en métal noirci de façon à ne laisser découverte que la longueur en question ; devant la lampe-étalon, de l'autre côté du photomètre, on dispose un verre coloré en vert : l'égalité d'éclairement est établie pour les radiations vertes, à condition d'avoir déterminé au préalable (voy. § 89) le *coefficient* de *transparence*, de ce verre vert, pour le flux lumineux de la lampe-étalon.

N. B. — La bobine de self-induction s'oppose aux variations brusques du courant dans la lampe.

163. *c*) **Lampe à tube de quartz.** — La longueur d'une lampe au mercure est réduite par l'emploi de tubes de quartz, dans lesquels on obtient une différence de potentiels de 30 volts par centimètre de longueur ; soit un peu moins de 4 centimètres de tube pour une lampe à 110 volts.

La *lampe Silica Westinghouse* (fig. 92) à tube de quartz A, peut osciller autour de la borne *a* reliée au (+) de la distribution ; un levier L est commandé par une tige C accrochée à un marteau de fer doux *m* (mobile autour de *i* et maintenu par une lame fixe de cuivre *j*), en face des noyaux d'un électro E, disposé entre les bornes *p* (+) et *n* (—) de la lampe, par l'intermédiaire d'un autre électro à bobine de self S, d'un rhéostat réglable R*h*, de *résistances de compensation* ρ (comme celles de la lampe Nernst) ; la liaison électrique de E à S a lieu par un contact K commandé par un marteau de fer doux H, en face des noyaux de l'électro S. La lampe A, posée à l'extrémité droite sur le crochet de la tige L, est pourvue d'ailettes aux extrémités (pour le refroidissement des électrodes pendant la marche), la lampe est ainsi en dérivation entre *p* et α, sur le circuit des électros.

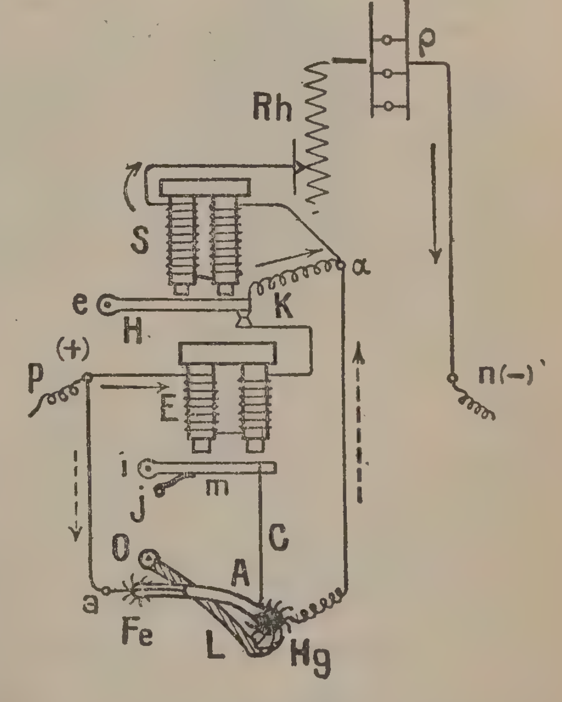


Fig. 92.

La lampe étant au repos, on lance le courant de *p* en *n* ; il ne peut passer que dans le circuit : (*p*-E-K-α-S-R*h*-ρ-*n*) : *m* est attiré, soulève

C, qui soulève L et la lampe : le mercure s'écoule au devant du fer; en même temps, H est attiré par S, il y a rupture en K et le courant cesse en E; *m* retombe, ainsi que C, L et A : l'arc s'allume quand le mercure se retire en Hg dans la boule de droite de A (la tension n'est que de 30 volts au début ; quand les électrodes sont suffisamment chaudes, la tension devient normale (110 ou 220 volts.)

Le tube de quartz est supporté par un taquet en bois, recouvert de feutre ; les mécanismes sont protégés par une cheminée métallique, et un réflecteur est disposé au-dessus de la lampe. La bobine S de self amortit les variations brusques de la tension aux bornes.

Cette lampe est construite pour donner 1.200 bougies hémisphériques sous 110 volts et 6 ampères ; ou : 3.630^{bd} hémisphériques sous 220 volts, en prenant 3 ampères et demi. Consommation spécifique : 0 vatt 25 ; elle se rapproche de celle des lampes à arc carbo-minérales. La courbe de distribution de l'intensité lumineuse a la forme de celle de la figure 48 α', avec une intensité horizontale un peu plus forte.

N. B. — En ajoutant du sodium ou du zinc, au mercure de la lampe, la lumière se corrige; des radiations jaunes ou rouges s'ajoutent aux radiations vertes et la lumière se rapproche de celle du soleil.

Remarque. — La lampe à tube de cristal est indiquée pour les laboratoires et les tables d'opération des hôpitaux, puisqu'elle éclaire sur une grande longueur.

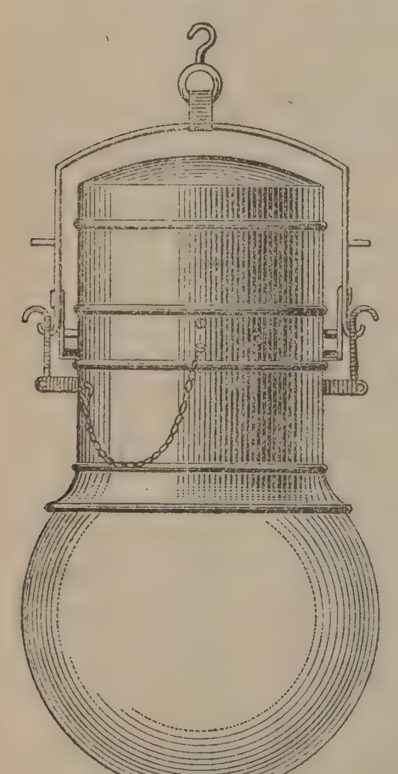


Fig. 93.

La lampe à tube de quartz (fig. 93) s'emploie comme la lampe à arc avec un *globe de verre* pour arrêter les rayons ultra-violets (ateliers, salles d'amphithéâtres ; la Compagnie des Tramways de Marseille l'a adoptée pour l'éclairage de sa station et des ateliers). Chacune de ces lampes fonctionne seule, et en dérivation, comme les lampes à incandescence.

164. *d*) **Lampe Nernst** au mercure et aux vapeurs salines. — Pour corriger la couleur verdâtre, gênante dans certains cas, des lampes au mercure, le Dr Nernst a imaginé une *lampe mixte* à mercure dans laquelle il a introduit un mélange de sels volatils. Dès que l'amorçage a lieu, les sels se volatilisent avec le mercure, et fournissent un spectre de raies qui se superpose à celui de la vapeur de mercure. Le mélange de sel est formé de 70% de chlorure de zinc, 15% de chlorure de calcium, 5% de chlorure de coesium, 5% de chlorure de lithium, et enfin 5% de chlorure de thallium.

Le spectre obtenu est sensiblement celui de la lumière blanche ; une lampe de 3.000 bougies-heffner consomme 0 watt 18 par bougie (brevet exploité par la Société AEG, de Berlin).

N. B.— Nous indiquerons au *chapitre IV*, l'emploi des lampes à mercure, comme *redresseurs de courants alternatifs*.

III° — Tubes luminescents (à azote, à néon)

Nous avons indiqué (§ 19) en quoi consiste la luminescence ; nous allons étudier des appareils propres à fournir une luminescence d'un éclat suffisant pour pouvoir les *utiliser à l'éclairage électrique*.

165. *a*) **Tube de Moore.** — La température à laquelle se produit la luminescence est *relativement faible* ; il en résulte que la lumière produite par la colonne gazeuse (à pression très faible) qui devient luminescente a un éclat assez faible, et qu'il est nécessaire dès lors de donner

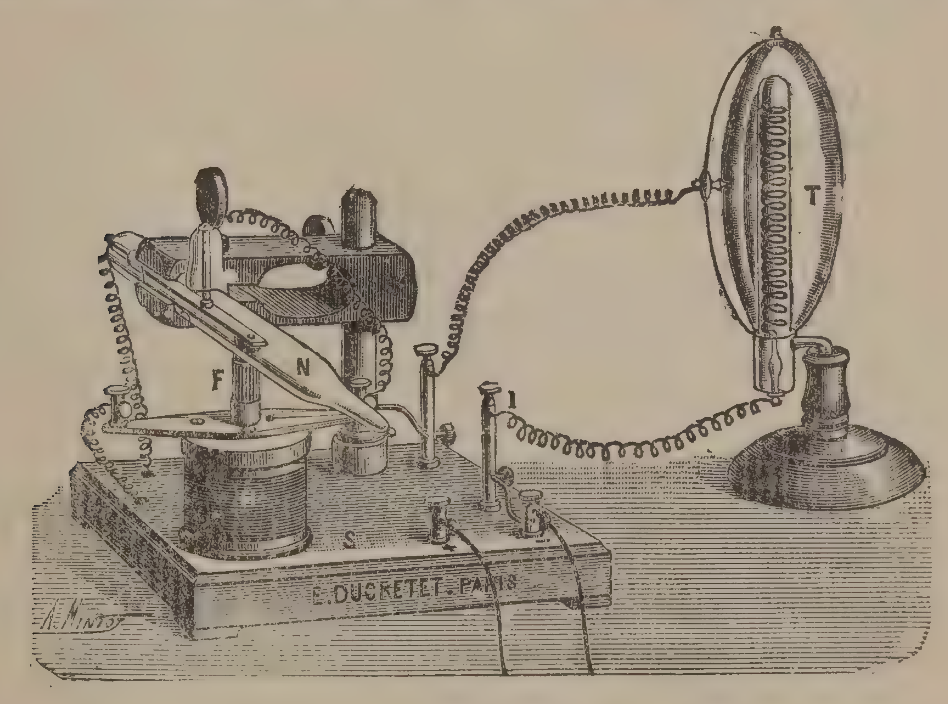


Fig. 94.

une grande longueur au tube qui la renferme si l'on veut obtenir une intensité lumineuse suffisante pour l'éclairage.

Mais une *tension élevée* est nécessaire, et le *courant* à utiliser *faible* ; l'emploi du *courant alternatif* est indispensable (pour obtenir des décharges dans le tube). Le premier tube de Moore (fig. 94) avait 44 mm. de diamètre, 2 mm. d'épaisseur, et sa longueur pouvait atteindre 60 à 100 mètres (le tube était *contourné* de façon à pouvoir être placé selon les angles du plafond d'une salle, avec les électrodes ramenées l'une près de l'autre) ; la pression du gaz employé (azote, gaz carbonique) était de l'ordre du $\frac{1}{10}$ de millimètre de mercure (vide fait avec une pompe rotative à huile).

Le tube T était relié au secondaire du transformateur H, alimenté comme la bobine de Ruhmkorff, par courant continu ; le trembleur de Neef N était renfermé dans un tube à vide, afin de supprimer l'étincelle de rupture, Le circuit du transformateur H était unique, servant à la fois de primaire et de secondaire : il fonctionnait comme secondaire à la rupture ou au rétablissement (par l'interrupteur N) du courant primaire : on obtenait des extra-courants (secondaires) de haute tension, plusieurs milliers de volts.

On obtenait une luminescence jaune-orangée avec l'azote, ou blanche-violacée (gaz carbonique) ; l'azote donnait un meilleur rendement lumineux comme nous l'avons fait comprendre déjà (à cause de la lumière jaune).

166. *a*) **Lampe Wedding.** — α) C'est un tube de Moore perfectionné, avec électrodes en graphite, rempli d'azote à $\left(\frac{1}{10}\right)$ m/m de mercure.

On le dispose aux bornes du secondaire d'un transformateur donnant 13.000 volts avec un courant de 0 amp. 25, à la fréquence 50, et dont le primaire est branché sur un circuit alternatif à 220 volts, où il prend 23 ampères ; le facteur de puissance $\frac{P}{EI}$ (fourni par le wattmètre (P), l'ampèremètre (I), et le voltmètre thermiques (E) est égal à 0,90 avec l'azote. Une bobine de self introduite dans le primaire atténue les oscillations de lumière dues à l'alternance des courants, et rend la lumière stable.

β) La *chute de tension* dans le tube est de 5 à 6 volts par centimètre de longueur, on emploie des tubes de 22^m de long. et de même diamètre que celui de Moore.

γ) On *photomètre* la lampe en recouvrant le tube d'un clinquant métallique noirci qui ne laisse à découvert qu'un centimètre de longueur ; l'étalon est une *lampe-Carcel* (dont la lumière se rapproche de celle de l'azote luminescent). On trouve 50 b.d. par mètre de longueur ; soit 300 bougies pour 6^m. La consommation spécifique est de 1 watt 7 par bougie (comme dans l'ancienne lampe au tantale). Le rendement lumineux n'est donc pas comparable à celui de l'arc au mercure ; l'éclat de la lumière n'est que de (0 bougie 16) centimètre-carré.

Avec un tube plus long, il faut évidemment une tension aux bornes plus grande ; avec un tube de 6^m, il suffirait de 3600 volts.

N.B.— Les électrodes absorbant de l'azote pendant le fonctionnement, la pression baisse le courant augmente, et l'intensité lumineuse diminue. Une soupape, commandée automatiquement par le courant du tube, laisse rentrer de l'azote au fur et à mesure que la pression de ce gaz baisse.

167. *b*) **Tube au néon.** — α) Principe. — M. G. Claude a perfectionné considérablement le principe du tube Moore, en tenant compte de tous

les aléas que présente ce dernier; il a choisi le *néon*, qu'il prépare pendant la liquéfaction de l'air (ce gaz *résiste* à la liquéfaction) ; M. Claude peut fabriquer *par jour* 100 litres de néon, avec sa machine à liquéfier l'air qui fournit 50 m. cubes d'oxygène à l'heure.

Ce gaz se laisse facilement traverser par la décharge électrique, 77 fois plus facilement que l'air (M. Bouty); on peut donc employer le néon, dans un tube luminescent, à une pression 10 fois plus grande que dans le tube de Moore.

Au fur et à mesure du fonctionnement du tube, le néon est absorbé par les électrodes a, a' (en cuivre), en même temps que le métal de celles-

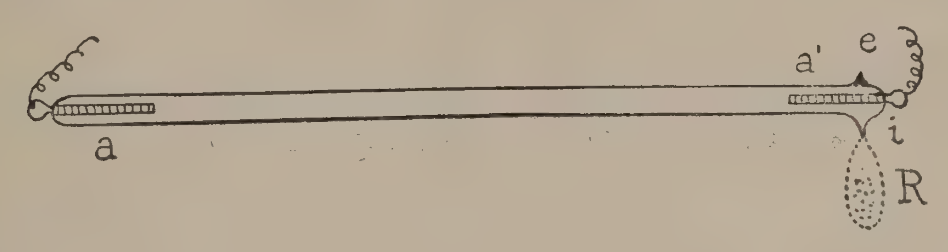


Fig. 94 *bis*.

ci se volatilise (le tube se recouvre d'un dépôt miroitant qui affaiblirait peu à peu son intensité lumineuse). M. Claude a obvié à ces inconvénients de la manière suivante : il soude, au tube luminescent (pendant sa préparation), un récipient purgeur à charbon R, enveloppé d'*air liquide*, et il fait fonctionner le tube; l'azote et l'hydrogène (occlus dans les électrodes) se dégagent, et viennent se condenser au sein du charbon; quand la luminescence du néon (qui aurait été atténuée par la présence de ces gaz, au point de disparaître au bout de quelques heures) est devenue normale, et fixe, on sépare à la lampe en *i* le récipient-purgeur du tube, lequel est fermé à la lampe en *e*, et ainsi préparé et terminé (fig. 94 *bis*).

Pour réduire la volatilisation des électrodes (qui *entraîne l'absorption du néon*), on *augmente leur surface :* pour une surface donnée de celle-ci, la volatilisation disparait, et le tube peut fonctionner 1.000 heures (tube de 5^m de long), durée comparable à celle des lampes à incandescence.

β) *Fonctionnement.* — La lumière obtenue est rouge-orangée ; elle exige une tension alternative assez élevée (plus faible toutefois qu'avec l'azote du tube de Moore); donc, un transformateur et une distribution de courant alternatif. Pour faire fonctionner le tube sur courant continu, il faut au préalable *redresser le courant alternatif* (soit à l'aide d'une commutatrice rotative, soit à l'aide de redresseurs à mercure). — M. Claude dit qu'il espère, grâce à la faible cohésion diélectrique du gaz, arriver à amorcer ses tubes sur courant continu.

γ) *Tension aux bornes.* — Les tubes de 6^m n'exigent que 800 volts aux bornes (4 fois 1/2 moins que le tube de Wedding); sur un transforma-

teur donnant 3200 volts aux bornes, sous *tension constante*, on peut disposer *3 tubes en série*, absorbant 2 kilowatts. Quand le courant augmente, la tension diminue (comme dans tous les tubes à gaz luminescents).

Toute la tension aux bornes n'est pas utilisée à la production de l'énergie lumineuse; il se produit une chute sensible de tension, des électrodes au gaz. Pour les électrodes en cuivre, un électromètre relié à 2 électrodes auxiliaires a permis d'évaluer à 150 volts, la chute pour *chaque électrode*; dans le gaz, la chute de tension est de 80 à 100^v par mètre (au lieu de 5 à 6^v dans le tube de Moore ou de Wedding); donc, pour un tube de 6^m, il faut compter aux bornes du tube, entre : $(480^v + 300^v) = 780^v$, et $(600^v + 300^v) = 900^v$.

δ) *Intensité du courant.* — Elle dépend plus du diamètre du tube que de sa longueur; avec un tube de 45 mm. de diamètre, il faut compter sur un courant de 1 amp. Une bobine de *self* (pour régler la tension) étant ajoutée au tube (en série avec lui), permet de faire varier (grâce à son *impédance*, variable à volonté comme nous l'avons indiqué à propos de la lampe à arc, § 153) le courant entre 0 a. 6 et 1 a. 3; on peut ainsi régler son intensité lumineuse à volonté.

La lumière est d'autant *plus rouge*, que l'intensité du courant est *plus faible*.

ε) *Puissance lumineuse.* — On la détermine comme pour la *lampe Wedding* (à azote) — voy. § 166. γ —; l'étalon est la lampe Carcel, qui donne une lumière jaune-rougeâtre facilement comparable; le photomètre est du type Bunsen-Burel. On détermine l'intensité horizontale par tranche de 20 cm., le reste du tube étant masqué par une feuille de clinquant noirci.

Un tube à néon de 6 m. de long, avec électrodes de cuivre de 0 m.50 (soit 5 m. de colonne gazeuse) donne 900 bougies décimales, soit 180 b. d. par mètre, au lieu de 50 b. d. dans le tube Wedding.

η) *Consommation spécifique.* — Il faut la rapporter, comme dans toutes les lampes à arc, à la *puissance totale absorbée*, évaluée aux bornes de la lampe, sous la tension E^v avec le courant de I ampères.

Les essais donnent, pour le tube de 900 bougies, $EI = 800^v \times 1^a = 800$ watts; soit $w' = \frac{800}{900} = 0$ watt 89, pour la *consommation spécifique totale*. Le facteur de puissance est : $\frac{P}{EI} = 0{,}80$. Il n'y a *pas de décalage* de l'intensité sur le courant, mais la courbe du courant est déformée par rapport à celle de la tension, ce qui explique ce facteur de puissance.

La puissance *réellement absorbée* aux bornes du tube luminescent, est donc :

$$P = 0{,}80 \times EI = 0{,}8 \times 800 = 640 \text{ watts};$$

et la *consommation spécifique réelle* est : $w = \frac{640}{900} = 0^w\,71$:

c'est celle qui représente réellement la *consommation spécifique de la lampe seule.*

N. B. — On pourrait réduire la *perte de charge* des transformateurs aux tubes, en employant des transformateurs donnant 1.000 à 1.200^v aux bornes du secondaire ; ou en branchant les tubes sur la *haute tension*.

Enfin, en tenant compte de la perte de charge dans les électrodes ($150^v \times 2 = 300^v$), il reste comme puissance électrique transformée exclusivement en luminescence : $P' = (800^v - 300^v) \times 1^a \times 0{,}80 = 400^w$; d'où une *consommation spécifique réduite* de : $w_1 = \frac{400}{900} = 0^w44$. Comme le *rendement lumineux* $\left(\frac{1}{w}\right)$ est d'autant plus grand que la tension dans le tube est plus grande — l'expérience l'a prouvé, avec des tubes alimentés en *haute tension*, c'est-à-dire *branchés directement* sur un circuit de haute tension, — il y aurait donc intérêt à employer des tubes plus longs.

Un tube de 13 mètres de long, replié en rectangle de 4 m. × 2 m. 50, fournit ainsi : $w' = 0$ w. 70, sous 1.200^v ; en *haute tension*, il donne 0 w. 60 ; M. Claude espère réduire la consommation totale w' à 1/2 watt.

θ) *Utilisation.* — La couleur du néon (rouge-orangé) est un peu fatigante à supporter par l'œil. Aussi l'éclairage au néon ne peut-il songer à entrer, dans la pratique courante, à côté des lampes à incandescence dans les appartements, bureaux, ateliers.

Mais là où il convient admirablement, c'est pour l'illumination des façades des théâtres et salles de spectacle, et pour les enseignes lumineuses.

La Maison *Paz et Silva* construit les lampes au néon, et les motifs pour enseignes ; ces motifs sont, ou formés d'un tube unique contourné pour reproduire un nom, une marque, un titre, soit d'une combinaison de tubes associés pour une enseigne à grosses lettres ; les tubes sont montés sur un découpage formant fond, ou sur des formes de lettres creuses. Chaque enseigne est pourvue du transformateur approprié aux tubes qu'elle renferme et au réseau d'alimentation.

Remarque. — On corrige souvent l'effet de coloration du néon par des tubes à vapeur de mercure ; au centre d'un tube à néon rectangulaire de 4 m. × 2 m. 50 (2.000 bougies) on place un tube à mercure de 600 à 800 bougies ; on obtient une coloration, d'ensemble, bleue et d'un effet agréable.

168. Tube au néon à basse tension. — M. Moore a réalisé récemment (1924) un tube au néon ainsi constitué (fig. 95) :

Un tube (3) est rempli de néon à la pression de 20 mm. de mercure ; il possède une soupape en son centre, pour écarter les impuretés, des

électrodes, et régler la pression du gaz automatiquement ; les électrodes cylindriques 4,5 sont reliées aux bornes 1,2 ; 2 électrodes supplémentaires 6,7 situées respectivement à moins de 0 mm. 4 de 4 et 5, sont reliées *entre elles*, alors qu'on établit entre 1 et 2 une tension alternative de 220 volts: il y a immédiatement fermeture des intervalles (6-4) et (7-5) et génération d'électrons; on a une décharge brillante dans la colonne positive 3.

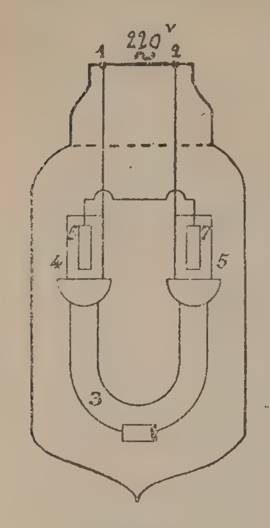


Fig. 95.

Quelques lampes de ce type peuvent marcher 400 heures sans changement appréciable.

169. **Lampe au néon-mercure.** — Elle est en quartz, à 2 électrodes; aux extrémités de la lampe sont soudés 2 petits réservoirs renfermant chacun un globule de mercure (1/2 centimètre cube) auquel aboutit chacune des électrodes (en graphite); l'ampoule-tube renferme du *néon* à la pression de 1 cm de mercure au moins; on relie cette ampoule, par ses électrodes, aux bornes du secondaire d'un transformateur, dont le primaire est pourvu d'une bobine de self. Pour allumer la lampe, on incline le tube de façon à étaler un filet de mercure entre les électrodes, puis on la redresse; le filet se rompt, et le néon s'illumine (la lampe est amorcée). Le professeur Collic a montré, *antérieurement*, que l'on pouvait illuminer le néon, en le recueillant dans un tube scellé renfermant quelques globules de mercure (le gaz étant à une pression de 20 cm) et en agitant simplement le tube ; cette remarque aide à comprendre le phénomène d'allumage de la lampe en question.

La tension nécessaire aux bornes vaut, au début, 2 volts par centimètre de longueur de l'arc luminescent ; dès que l'allumage est commencé, le mercure s'électrovaporise et la tension devient plus basse : 1/2 volt par centimètre de longueur d'arc ; la lumière obtenue à ce moment n'offre plus que les raies du spectre du mercure ; le gaz, éliminé, se dépose dans des réservoirs soudés au tube, et avec la vapeur de mercure. Au bout de quelques secondes, la force élastique du mercure croissant, la tension aux bornes croît elle-même, comme on le conçoit aisément (d'après ce que nous avons dit du fonctionnement de la lampe à mercure) ; quand le régime normal est atteint, la tension électrique vaut 50 volts par centimètre de longueur d'arc. La température atteinte par la paroi est de 700° centigrades (le régime normal est établi 7 minutes après l'allumage.

Cette lampe consomme 2 kilowatts, avec un tube de 40 cm., la tension aux bornes (fournie par le secondaire du transformateur) est 2.250 volts (avec 110ᵛ aux bornes du primaire, disposé sur un réseau ordinaire alternatif servant à l'éclairage) ; elle prend un ampère, et présente un facteur de puissance égal à 0,70.

En somme, cette lampe est une lampe à vapeur de mercure, dans laquelle le néon sert, au début, à l'amorçage.

Remarque. — La décharge qui se produit entre les électrodes, dans un tube à néon, est due à un courant d'*électrons* (négatifs) vers l'anode, et à un courant d'atomes ou *ions* (privés de leur charge négative après ionisation, donc *positifs*) vers la cathode; lesdits courants transportent l'énergie électrique, laquelle se manifeste par l'étincelle de décharge ; mais ces courants de *sens inverse* provoquent la recombinaison de quelques *électrons* et *ions libres*, et il se produit une *émission lumineuse*, due précisément à ce choc entre eux.

Pour une tension électrique donnée, le champ électrique qui règne entre les électrodes est d'autant plus intense que celles-ci sont plus rapprochées; mais l'ionisation n'est intense que si la vitesse acquise par les électrons est intense elle-même; dans un gaz à *basse pression*, elle sera plus facile que dans un gaz à pression élevée. Dès lors, si l'on considère un tube renfermant du néon à basse pression (quelques millimètres), et si l'on rapproche les électrodes, la décharge pourra s'amorcer sous une *tension réduite*.

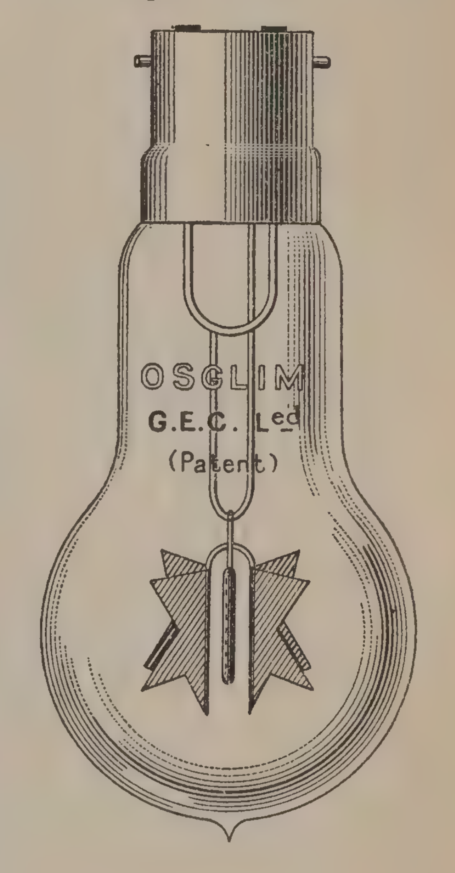


Fig. 95 *bis*.

Ceci explique le fonctionnement de la lampe de Moore de la fig. 95; et aussi celui de la nouvelle lampe de la fig. 95 *bis*, qui ressemble par sa forme extérieure à une lampe à incandescence, et se construit de façon analogue (rev. *Construction* des lampes à incandescence, Chap. II, I°; B.); l'une des électrodes a la forme d'une double étoile, l'autre est cylindrique, elles sont reliées aux 2 pastilles du culot (lampe à baïonnette) : le gaz néon y est enfermé à une pression de 20 mm. de mercure. La lampe fonctionne sous 220 volts. Elle peut servir de lampe-veilleuse (chambres; couloirs; escaliers); elle consomme 5 watts seulement; elle s'emploie aussi dans les laboratoires photographiques, l'ampoule est alors colorée en *rouge-rubis*, et ne laisse passer que des radiations rouges. On fabrique aussi des lampes de même forme pour la publicité, l'une des électrodes ayant la forme d'une lettre; on réalise avec ces dernières lampes, groupées convenablement, des *enseignes lumineuses*. (M. R. Brocard).

170. **La lampe nouvelle H. Georges** (qui figurait à l'Exposition de physique de 1924) est pratique; elle fonctionne sur courant continu à

115 volts et 3 ou 5 amp., la tension est abaissée à 80 volts par un rhéostat intercalaire Rh ; une nappe de mercure s'étale au niveau xy à la base de 3 récipients A, B, C D dont l'un, le central, B, renferme une lame électrode f en *nickel-chrôme,* au contact du mercure ; au-dessus du mercure en B et A se trouve du néon (ou de l'argon) à la pression de 70 cm. de mercure ; un réservoir R peut communiquer avec A B C D, par un petit orifice inférieur α; le tube A possède un étranglement e (servant à amortir les oscillations du mercure) ; fig. 96.

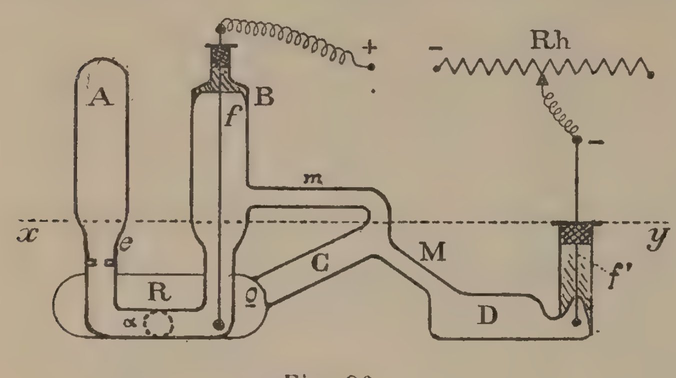


Fig. 96.

Si l'on relie par les électrodes, le tube aux bornes, la lame f s'échauffe, et échauffe le gaz qui *se dilate,* et repousse le mercure dans le réservoir R et dans le tube A ; le niveau x y baissant, le mercure *se coupe* en M, et un arc s'amorce (en 5 ou 10 secondes) entre les niveaux C et D. L'élimination du gaz ayant servi à l'amorçage est assuré par la circulation constante de la vapeur de mercure. En somme, ici, la rupture de la colonne de mercure et par suite l'allumage sont opérés *automatiquement* par la dilatation du gaz ; (lampe construite par les Etablissements Gallois et Cie).

Il existe un type de lampe du *même auteur,* pour courant alternatif ; l'alimentation se fait sous 3.000 volts grâce à un transformateur (110^v-3.000^v) ; et avec un courant de 1 amp.; le gaz est à une pression de 1 cm. de mercure au moins.

N. B. — Les *essais photométriques* de ces 3 dernières lampes n'ont pas encore été publiés ; on doit donc les considérer comme étant toujours à l'étude.

IIIe PARTIE. — ÉCLAIRAGE RATIONNEL; PROJETS D'ÉCLAIRAGE

1° *Principes fondamentaux*

171. Définitions. — On entend par *éclairage rationnel,* un éclairage obtenu en disposant, dans la pièce d'appartement, dans le bureau, dans l'atelier à éclairer, les lampes de façon à fournir la *meilleure répartition* possible de la lumière, c'est-à-dire à n'avoir *aucune ombre défectueuse,* pas plus qu'aucune surface trop crûment éclairée au détriment de parties voisines ; en résumé, l'éclairage rationnel devra donner un *éclairement suffisant,* tout en respectant l'économie et l'hygiène de la vision.

172. 1° **Avantages d'un bon éclairage.** — Les avantages d'un bon éclairage sont aisés à établir :

a) dans les *appartements*, un éclairage bien compris permettra de donner aux meubles, aux tapisseries, aux objets divers suspendus aux murs, ou placés sur les meubles ou les étagères, un aspect agréable et favorable à la vue de tous ;

b) dans les *magasins*, il devra permettre de voir aussi nettement les rayons de couleur, que les rayons de blanc, mettre en valeur les étoffes sombres comme les étoffes claires, de façon à faciliter le choix des emplettes en toute connaissance de cause ;

c) dans les *bureaux*, l'éclairage bien compris permettra aux employés de voir nettement leur travail, en mettant en pleine lumière les éléments qui collaborent à rendre ce travail facile et agréable (bureaux, machines à écrire, casiers, etc.) ;

d) dans les *ateliers*, un bon éclairage augmente la production, à égale rétribution du personnel ; il permet un travail plus soigné, plus régulier ; il entraîne une réduction sensible des déchets, une diminution des accidents provoqués par les machines-outils ou les métiers ; il évite la fatigue de la vue, les détails des objets fabriqués et des machines étant bien éclairés ; il en résulte une surveillance facile du personnel, des machines, des appareils de transport ; les ouvriers s'y sentent plus à l'aise, l'hygiène de la vue y est assurée pour tous ;

e) dans les *salles de dessin*, il doit offrir un éclairement aussi égal que possible des tables à dessiner, afin de permettre aux dessinateurs de ne rien perdre des détails, et d'y travailler sans aucune fatigue de l'œil ;

f) les *façades* des magasins (modes, nouveautés, confections, ameublements), des hôtels, des théâtres, des édifices publics, outre qu'un bon éclairage les met en valeur, y gagnent aussi au point de vue de l'esthétique, — et au point de vue de la réclame ;

g) les *voies publique*, les *places* ont besoin d'un bon éclairage qui leur fournisse, en même temps qu'un aspect agréable, la possibilité pour les piétons, les voitures, de circuler la nuit en toute sécurité ; ceci est surtout à considérer dans les grandes artères des villes populeuses.

173. 2° **Influence de l'éclairement sur les facultés visuelles.** — Nous avons, au § 69, défini ce qu'il faut entendre par *facultés visuelles* ; et nous avons montré que ces facultés sont *améliorées* grandement par un *bon éclairement* des surface et des objets. Il ne faut pas perdre de vue ces considérations dans l'établissement d'un projet d'éclairage.

174. 3° **Eblouissement.** — C'est une impression de gêne ressentie par l'œil qui reçoit les radiations d'une lampe trop éclatante, et qui se traduit par un aveuglement plus ou moins prononcé ou plus ou moins prolongé.

L'éblouissement est dû, soit : à l'*éclat exagéré* d'une lampe (cas d'une lampe au tungstène en atmosphère inerte, à ampoule claire, placée dans le *champ de vision*, *trop près* de l'*axe de vision*) ; soit au *contraste*; soit à la *réflexion* ou à la *diffusion* des surfaces polies ou brillantes.

On admet que l'axe de vision est horizontal, et que l'*angle de vision* convenable pour éviter l'éblouissement doit être au minimum : 30° (c'est l'angle fait par les rayons lumineux d'une lampe avec l'axe de vision). Il faut donc placer les lampes en *dehors* d'un angle de 30° pour éviter l'éblouissement.

Un éclairage bien compris doit répartir *uniformément* les appareils lumineux, de façon à éviter les *contrastes* dûs aux zones d'ombre et de lumière : il faut, pour cela, condamner l'*éclairage local* — c'est-à-dire celui qui a en vue l'éclairage des parties principales, au détriment de l'ensemble, — et le remplacer, ou le compléter, par un *éclairage général*, qui atténue les zones d'ombre, en étendant davantage celle d'éclairement.

Une *lampe intense*, même placée en dehors de l'angle de vision, peut *éblouir* si une partie de ses radiations sont renvoyées dans l'œil du travailleur, dans un atelier principalement, par les surfaces polies ou brillantes des machines ou des métaux élaborés ; il faut tendre à éviter cette sorte d'éblouissement.

175. 4° **Divers systèmes d'éclairage.** — Il existe 3 catégories principales ou *systèmes d'éclairage*, selon la distribution de lumière à utiliser :

α) l'*éclairage direct* : les radiations lumineuses viennent directement des lampes sur les surfaces à éclairer ; les lampes n'étant pourvues d'aucun diffuseur qui modifie la direction du flux ; — les lampes employées à cet effet sont à *ampoule claire* (si elles sont placées assez haut pour ne pas éblouir), ou à *ampoule opaline* pour ne pas fatiguer l'œil, et éviter des points brillants sur les surfaces à éclairer ; ou avec *réflecteur*, si l'éclairement des parties horizontales seules est en cause. Ce système convient aux pièces dont les murs et le plafond n'ont pas de pouvoir réfléchissant appréciable.

On emploiera les *ampoules claires*, sans réflecteur, quand il y aura nécessité d'assurer l'éclairage des parties verticales des pièces à *plafond peu élevé*, aussi bien que des parties horizontales ; les ampoules *opalines*, — ou dépolies, — diffusant mieux, donneront un éclairage plus doux à l'œil, *sans éblouissement possible*, et permettront d'éclairer aussi bien les surfaces horizontales que les murs ; — les *réflecteurs* sont indispensables quand l'éclairage doit surtout être réalisé sur les surfaces horizontales, et que le plafond ne présente pas une surface bien diffusante ; (salles d'études, salles de dessin) sans négliger cependant un éclairement suffisant des *murs*, pour éviter un contraste : les

lampes seront suspendues à hauteur convenable à cet effet, afin que les murs (au moins dans les parties rapprochées des tables de travail) soient dans la zone de distribution du flux lumineux.

β) *l'éclairage indirect* ; les radiations sont toutes dirigées, grâce à la disposition du réflecteur utilisé, vers *le plafond*, qui les diffuse ensuite dans toute la pièce à éclairer; (si la couleur du plafond est *suffisamment claire*).

Ce système est indiqué pour les salles d'études et de dessin à *plafond* assez bas, les lampes étant appliquées, tout près du plafond, avec un *réflecteur sous la lampe* ; (ce qui obligerait, avec le système direct, à employer des globes opalins afin d'éviter l'éblouissement; d'où une perte par absorption de ces globes; de plus, les appareils étant plus près des tables, dans l'éclairage direct avec un tel plafond, seraient exposés à être détériorés accidentellement) ; — c'est aussi un éclairage de luxe, pour les *appartements*, car il met en valeur toutes les surfaces (verticales et horizontales).

γ) l'*éclairage semi-indirect* ; les lampes sont *nues* ; dans la partie inférieure est disposée une coupe opaline, ou un globe holophane, ouverts vers le haut ; des radiations directes (de l'hémisphère inférieur) traversent la coupe, ou le globe ; en même temps que les radiations émises dans l'hémisphère supérieur, tombent sur le plafond qui les diffuse dans tous les sens (ceci implique un *plafond* et des *murs clairs*) ; ce système se recommande pour les grands bureaux, et les salles de dessin, ainsi que pour les ateliers à plafond assez élevé, et à plafond et murs bien diffusants.

Remarque. — Un examen judicieux de la pièce à éclairer fixera immédiatement sur le système à adopter ; il faudra tenir compte, également, de la *nature du travail*, afin d'obtenir un égal éclairement de toutes les parties qui doivent être rendues visibles.

176. 5° **Répartition des lampes**. — L'éclairement obtenu avec une lampe donnée, — *nue, opaline*, ou pourvue d'un *réflecteur* ou d'un *réfracteur*, — n'est uniforme que dans un champ restreint autour de la lampe (rev. *distribution du flux* autour des lampes, *nues*, *opalines*, ou *avec réflecteurs* ; § 100 ; 101 ; 137). La distance horizontale à laquelle l'éclairement cesse d'être uniformément réparti, sur une surface horizontale, est proportionnelle à la distance verticale de la lampe à cette surface : si cette distance est doublée, le même flux atteindra des points situés à une distance horizontale double.

Dès lors, l'*écartement* des lampes d'une même pièce, pour obtenir une bonne répartition du flux lumineux, devra dépendre de la *hauteur* de ces lampes au-dessus de la *surface utile*. (Voy. explications au § 178). On adopte, pour la hauteur de la surface utile, — ou *plan utile*, — au-dessus du sol, ou du plancher, la valeur constante : 0 m. 75.

L'*expérience* montre que la hauteur H du foyer lumineux, au-dessus du plan utile, est liée à l'écartement maximun E de 2 lampes, par les relations suivantes, selon le système d'éclairage à adopter ; nous donnerons également la distance horizontale D des lampes extrêmes au mur voisin.

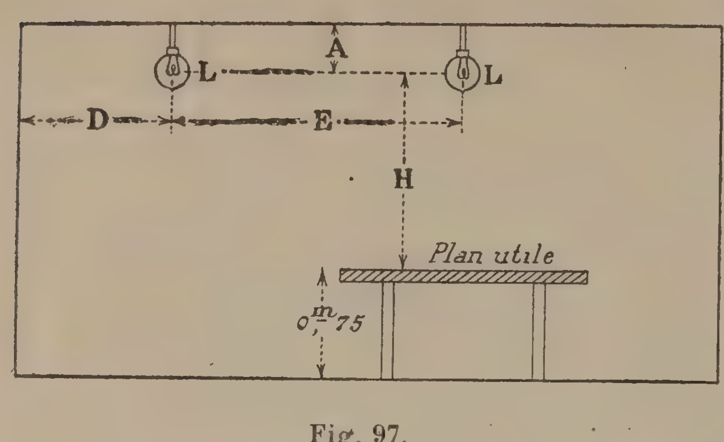


Fig. 97.

α) Système direct : On prend :

$\frac{E}{H} \leq 1,5$; et : $D = \frac{E}{2}$

(cas général) ; dans les ateliers où des machines sont près des murs, on prend D plus faible : $D = \frac{E}{3}$ (fig. 97) ; ceci pour les salles de travail, ou les appartements.

β) Système indirect, ou semi-indirect : On prend encore : $\frac{E}{H} \leq 1,5$; et : $D = \frac{E}{2}$ ou $\frac{E}{3}$; mais H représente, ici, la hauteur du plafond (considéré comme source de lumière principale, car il diffuse plus de radiations que la lampe n'en envoie directement) au-dessus du plan utile ; il faut, dans ce cas, fixer la distance au plafond du foyer lumineux : $A = \frac{E}{6}$. (fig. 98).

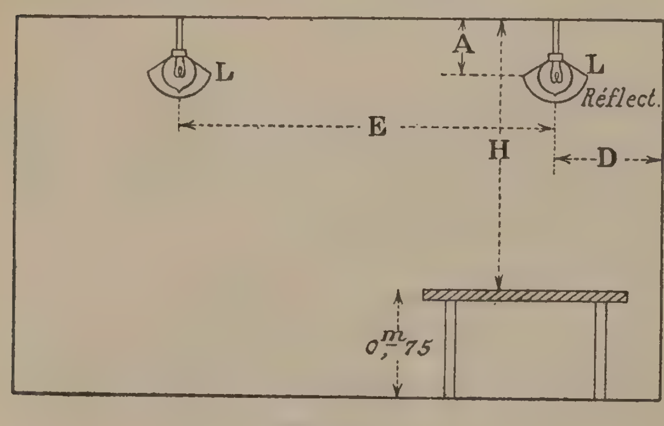


Fig. 98.

γ) *Voies publiques* ; système direct ; avec : E=8H ; (H=distance des *lampes au sol*, comprise entre 5 m. et 8 m.

177. 6° **Valeur de l'éclairement**. — La valeur de l'éclairement dépend évidemment de la nature du travail à effectuer (ateliers, bureaux, salles de dessin), et de la nature des surfaces à éclairer, (ateliers) ainsi que de la couleur des surfaces, ou de leur aspect (pièces d'appartement, bureaux, voies publiques) ; ces chiffres varient, pour une même pièce, selon la couleur des murs ; plus grands avec des murs sombres qu'avec des murs clairs. — Nous donnons ci-après, et en *lux* les chiffres généralement admis :

		LUX
Appartements	Salon, salle à manger, chambre à coucher	25 à 40
	Bureaux	40 à 60
	Cabinets de toilette	20 à 40
	Vestibules, couloirs	10 à 20
Garages d'automobiles		40 à 60
Hôtels	Restaurant, salons	30 à 60
	Cafés (salles de)	50 à 100
	Chambres	30 à 50
	Couloirs, vestibules	10 à 20
Salles de conférences, églises		20 à 40
Bureaux d'administration	Bureaux	50 à 80
	Salles d'attente	20 à 40
Ecoles (salles de conférences, études)		40 à 80
Salles de dessin		80 à 150
Laboratoires		60 à 120
Salles de spectacle		40 à 80
Magasins	Etalages	100 à 150
	Salles sur rues éclairées	60 à 100
	Vêtements, tissus, modes, bijouteries	50 à 150
	Epiceries, boulangeries, boucheries	40 à 100
	Librairies	60 à 100
Industries diverses	α) Outillage, grosse mécanique, forges, scieries, tanneries, poteries	30 à 50
	β) Petit outillage, papeteries, blanchisseries	40 à 60
	γ) Ateliers de précision, corroieries, ébénisterie, horlogerie, imprimerie, ateliers textiles, couture	60 à 100
	δ) Horlogerie fine, bijouterie (*id.*), gravure, typographie, textiles (sombres)	80 à 200
Entrepôts, docks, halls de chemins de fer		20 à 30
Voies publiques (rues)		0,2 à 5
»	(boulevards, avenues, places, jardins	5 à 6

N. B. — Pour des *surfaces moyennement éclairées*, il suffira d'adopter la *moyenne* des *valeurs extrêmes du tableau*. — Ces valeurs ont été fournies *expérimentalement*, en appliquant la formule 38 (§ 103) que nous avons établie précisément, pour l'éclairement des divers points situés à des distances : verticale (h) et horizontale (D) d'un foyer lumineux.

178. 7° **Variations de l'éclairement.** — Il résulte, de l'examen de cette formule, que : en 2 points différents d'une même pièce éclairée par une lampe, les éclairements obtenus sont différents (h seule est *la même*

pour ces 2 points; mais $\mathcal{L}$ et D varient) ; selon la courbe de *distribution du flux* autour de la lampe il faut s'efforcer, dans la pratique, d'obtenir que, pour un point B plus éloigné horizontalement qu'un point A, du foyer d'une lampe, — ce qui tend à diminuer son éclairement E, — l'intensité lumineuse dans la direction correspondant à B, soit un *peu plus grande* que dans la direction correspondant à A (pour lequel D est plus faible); dans ces conditions, le quotient $\frac{\mathcal{L}}{(D^2 + h^2)^{3/2}}$ demeurera sensiblement le même pour les 2 points, h étant la même comme nous l'avons dit.

Dans une pièce éclairée par une *seule lampe* suspendue au centre du plafond, la courbe de distribution de la lumière du type adopté (ampoule *nue*, ou avec réflecteur) étant connue (§ 100 ; 101 ; 137), on suspendra la lampe à hauteur voulue pour que l'intensité lumineuse soit *un peu plus grande* au fur et à mesure que l'*on* s'*éloigne* de l'axe vertical de la lampe; nous savons qu'avec les lampes à incandescence avec réflecteur, et avec les lampes à arc (sans réflecteur, mais à globe opalin qui ne modifie en rien la forme du flux lumineux : il y a simplement absorption d'une partie de ce flux), l'on obtient des courbes qui répondent à la question ; au moins jnsqu'à une distance horizontale telle que les points éclairés correspondants ne soient pas au-delà des radiations d'intensité maxima (revoy. les graphiques en question) : ceci ne sera obtenu qu'avec une pièce d'appartement de petites dimensions.

Pour une *salle plus grande*, — ou une étude, ou un bureau, ou une voie publique, — les lampes à installer seront placées de façon à ce qu'il ne se produise pas de solutions de continuité (représentées par des *ombres*), entre les surfaces éclairées ; le rapprochement E des lampes doit être déterminé de façon à résoudre la question. Les formules données au § 176, et vérifiées par l'expérience, donnent la solution du problème en tenant compte des systèmes d'éclairage adoptés.

179. 8° **Divers coefficients à utiliser dans une installation.** — Lorsqu'on établit un *projet d'éclairage*, il faut tenir compte de *certains coefficients* que nous allons définir.

α) *Coefficient d'utilisation.* — C'est le rapport du flux utile F_u (reçu par les surfaces à éclairer), au flux total F émis par les lampes; on le désigne ainsi :

(54) $u = \frac{F_u}{F}$; la différence : $(F - F_u)$ représente le flux absorbé par le réflecteur, le plafond, les murs.

Ce coefficient varie avec les dimensions du local; il n'a pas la même valeur quand la pièce à éclairer est carrée ou lorsqu'elle est rectangulaire (on comprend que le flux utile varie d'un cas à l'autre); il dépend, en outre du *coefficient de réflexion* des murs et du plafond, de la

lampe choisie (avec ou sans réflecteur), et de l'*indice du local à éclairer*; si la pièce en question a une *longueur* de a mètres, une *largeur* de b mètres, et si u_a et u_b sont les coefficients d'utilisation respectifs d'une *pièce carrée* de a m. et de b m. de coté, on pose :

(55) $$u = u_b + \frac{u_a - u_b}{3}$$

β) *Indice du local.* — Or, ces coefficients u_a, u_b ont été établis *empiriquement*, en tenant compte de l'*indice du local* : i, que l'on définit ainsi (par rapport à a ou à b) ; pour l'*éclairage direct* :

(56) $i = \dfrac{b \text{ ou } a}{2 \times H}$ (H = *hauteur* des *lampes* au-dessus du *plan utile*) ; pour *l'éclairage indirect* ou *semi-indirect* :

(57) $i = \dfrac{b \text{ ou } a}{{}^4/_3 \, H}$ (H étant, dans ce 2ᵉ cas, la hauteur du plafond au-dessus du plan utile).

Les *tableaux suivants* nous donnent les valeurs de u_a ou u_b, pour pièces carrées, en fonction de l'*indice du local i* (calculé au préalable avec les formule 56 ou 57), et du *coefficient de réflexion* ρ *du plafond et des murs* (d'après M. J. Wetzel); ces chiffres se rapportent à divers appareils (lampes avec réflecteurs, ou verres diffusants).

180. 9° **Tableaux des coefficients d'utilisation pour pièces carrées.** — Nous donnons ci-après les *valeurs moyennes* (et suffisantes dans la pratique), du coefficient d'utilisation d'une *pièce carrée.* Nous verrons ensuite que ces coefficients une fois connus, on en déduit le coefficient u (formule 55), lequel servira enfin à déterminer la puissance du type de lampe à employer.

α) *Lampe claire avec réflecteur métallique* (à émail blanc) :

ρ = { plafond / murs	clair = 0,6		sombre = 0,3
	clairs = 0,5	sombres = 0,2	sombres = 0,2
i_a ou i_b	u_a (ou u_b)		
0,6	0,32	0,29	0,26
1	0,42	0,40	0,38
1,5	0,47	0,46	0,44
2	0,51	0,49	0,48
3	0,56	0,54	0,53
4	0,59	0,57	0,56
5	0,60	0,58	0,57

β) *Lampe demi-émaillée*, et *réflecteur métallique* (émaillé blanc) :

$\rho =$ plafond / murs	clair = 0,6 — clairs = 0,5	clair = 0,6 — sombres = 0,2	sombre = 0,3 — sombres = 0,2
i_a ou i_b	u_a ou u_b		
0,6	0,29	0,26	0,24
1	0,38	0,36	0,34
1,5	0,43	0,41	0,39
2	0,46	0,44	0,43
3	0,50	0,48	0,47
4	0,52	0,50	0,49
5	0,53	0,51	0,50

γ) *Lampe claire et globe légèrement opalisé* :

$\rho =$ plafond / murs	clair = 0,6 — clairs = 0,5	clair = 0,6 — sombres = 0,2	sombre = 0,3 — sombres = 0,2
i_a ou i_b	u_a ou u_b		
0,6	0,24	0,19	0,16
1	0,34	0,29	0,26
1,5	0,40	0,35	0,31
2	0,45	0,40	0,36
3	0,51	0,46	0,41
4	0,55	0,50	0,45
5	0,57	0,53	0,47

δ) *Lampe à ampoule opaline* :

$\rho =$ plafond / murs	clair = 0,6 — clairs = 0,5	clair = 0,6 — sombres = 0,2	sombre = 0,3 — sombres = 0,2
i_a ou i_b	u_a ou u_b		
0,6	0,31	0,26	0,24
1	0,42	0,38	0,36
1,5	0,49	0,45	0,42
2	0,54	0,50	0,47
3	0,60	0,56	0,53
4	0,63	0,60	0,56
5	0,65	0,61	0,58

ε) *Lampe claire avec globe diffusant* (holophane) et *réflecteur métallique* :

ρ = { plafond / murs	clair = 0,6		sombre = 0,3
	clairs = 0,5	sombres = 0,2	sombres = 0,2
i_a ou i_b	u_a ou u_b		
0,6	0,22	0,17	0,15
1	0,31	0,26	0,24
1,5	0,36	0,32	0,29
2	0,40	0,36	0,33
3	0,45	0,42	0,40
4	0,48	0,45	0,43
5	0,50	0,47	0,45

η) *Lampe claire avec coupe opalisée légèrement, ou coupe holophane* :

ρ = { plafond / murs	clair = 0,6		sombre = 0,3
	clairs = 0,5	sombres = 0,2	sombres = 0,2
i_a ou i_b	u_a ou u_b		
0,6	0,15	0,12	0,08
1	0,22	0,18	0,13
1,5	0,27	0,23	0,17
2	0,31	0,27	0,20
3	0,36	0,32	0,24
4	0,40	0,36	0,27
5	0,42	0,38	0,29

Remarque. — On admet que l'*indice du local* ne *dépasse jamais* la *valeur* 5 ; dans le cas où l'on trouverait un nombre supérieur à 5, on prendrait 5 pour valeur de *cet* indice ; l'expérience montre que les indices u_a, u_b ne *varient plus sensiblement* après une valeur de i supérieure à 5, laquelle serait donc une *valeur limite* pratique.

181. 10° **Usage des tableaux.** — Si la *valeur réfléchissante* du plafond ou des murs est *intermédiaire* entre celles du tableau, on fait un calcul d'interpolation, pour obtenir la valeur de l'indice u_a (ou u_b). Ainsi, supposons que l'on ait trouvé par le calcul : $i=2,5$ avec plafond *clair*, et *mur assez clair* ; on trouvera (cas de l'emploi d'une lampe claire avec rfleécteur métallique ; tableau α) pour *plafond clair* et *mur assez clair*,

et pour $i=2$, — en prenant pour un mur *assez clair*, la moyenne des valeurs trouvées pour un *mur clair*, et un *mur sombre* : 0,50 ; — et en faisant de même pour : $i=3$, on trouvera : 0,55 ; on prendra donc, pour $i=2{,}5$ une valeur x ainsi calculée *par interpolation* :

$$\frac{x - 0{,}50}{0{,}55 - 0{,}50} = \frac{2{,}5 - 2}{3 - 2}; \text{ d'où : } x = 0{,}525.$$

182. 11° **Voies publiques ; places, squares.** — Une fois choisi l'appareil destiné à éclairer une voie publique, on se servira des tableaux précédents, en remarquant que le plafond, dans ce cas spécial, est remplacé par la *voûte céleste* ; et l'on considérera les choses dans les circonstances les *moins favorables*, c'est-à-dire avec une *voûte très sombre* ; mais il faudra tenir compte, également, que les constructions qui bordent l'avenue ne sont pas éclairées, — étant donné que cet éclairement des voies publiques doive subsister après l'extinction des lumières des magasins et édifices qui les bordent.

Dans ces conditions, l'on adoptera les coefficients suivants, après avoir évalué i d'après les dimensions de l'*avenue* ou de la *place* publiques, considérées comme des salles fermées avec plafond et murs très sombres, — et selon les appareils d'éclairage adoptés :

	i	0,6	1	1,5	2	3	4	5
Lampe claire et réflect. métallique émaillé blanc.	u_a ou u_b	0,20	0,32	0,38	0,42	0,47	0,50	0,52
Lampe claire et globe légèrement opalisé	u_a ou u_b	0,10	0,22	0,28	0,31	0,37	0,41	0,42
Lampe à ampoule opaline, ou lampe à arc avec globe opalin.	u_a ou u_b	0,22	0,35	0,40	0,45	0,50	0,52	0,55

183. **Coefficient de dépréciation.** — C'est le rapport δ entre le flux fourni par les appareils d'éclairage adoptés quand ils se trouvent dans les meilleures conditions de conservation, et le flux émis après un certain service dans des conditions habituelles d'usure ou d'entretien ; ce coefficient δ est évidemment égal à 1 au début, dès l'installation terminée avec un *appareillage neuf*. Au bout d'un certain nombre d'heures, la poussière se déposant sur les ampoules ou les globes, sur les réflecteurs et les murs, et les lampes ayant perdu de leur intensité lumineuse (par usure du filament par exemple), le coefficient δ a pris une valeur bien supérieure à 1. On accepte un nombre moyen, correspondant à la moitié de la durée des lampes (1,5 avec les lampes à incandescence ; 1,2 avec les lampes à arc où il y a seulement à considé-

rer l'encrassement des globes et des réflecteurs). Sur les avenues, places publiques, squares, on peut prendre pour δ la valeur 1,75.

184. **Flux lumineux à fournir par une lampe.** — Si S m² est la surface du *plan utile*, E l'éclairement adopté (d'après le tableau du § 177), le flux total à recevoir sur le plan utile vaudra : $F_u = E \times S$.

Pour l'ensemble des appareils, le flux à émettre (formule 54) vaudra : $F = \frac{F_u}{u}$; ou $F = \frac{E \times S}{u}$; mais il faut tenir compte du coefficient de dépréciation : δ; et le flux à émettre *réellement* sera plus grand : $F' = F\delta = \frac{ES\delta}{u}$.

Si n est le nombre de lampes, — d'après leur écartement selon chaque dimension de la pièce, ce nombre vaudra : $\frac{a}{E} \times \frac{b}{E} = n$, — on aura donc, pour le flux à émettre par une lampe neuve seule : (58) $f = \frac{F'}{n} = \frac{ES\delta}{nu}$. En cherchant ensuite dans les tableaux des valeurs du flux émis par les types de lampes connus, on choisira celles qui répondent à la question (§§ 115 à 117; et 133 à 149).

Remarque. — Lorsque la disposition symétrique du local et des surfaces à éclairer permet de distribuer le premier *en rectangles égaux*, ayant au centre l'un des foyers éclairants, la surface s de chaque rectangle à éclairer par 1 seule lampe sera : $s = \frac{S}{n}$; d'où, en portant dans 58, et simplifiant, la formule plus simple :

(59) $f = \frac{Es\delta}{u}$; on déduit ensuite : $\left(n = \frac{S}{s}\right)$, si l'on s'est donné s *a priori*.

2° *Projet d'éclairage*

185. — Nous avons maintenant tous les éléments nécessaires à l'établissement d'un projet d'éclairage électrique. Ce projet comportera les opérations suivantes :

a) Calcul de l'écartement E maximum admissible entre les lampes, lequel vaut :

α) éclairage direct : $\leqq$ H (haut. appareil au-dessus du plan utile) $\times 1{,}5$.

β) éclairage indirect, ou demi-indirect : $\leqq$ H (haut. du plafond au-dessus du plan utile) $\times 1{,}5$.

N. B. — La valeur trouvée pour E est un *maximum;* on peut la réduire selon la *disposition des lieux.*

a') Calcul de la distance maxima D des lampes aux murs : $D = \frac{E}{2}$ (ateliers où les machines sont éloignées des murs); ou : $D = \frac{E}{3}$ (ateliers où il y a des machines près des murs) ;

b) Calcul du *nombre* des foyers lumineux : $n = \frac{a}{E} \times \frac{b}{E}$; ce qui revient à diviser la surface rectangulaire de la salle en carrés égaux, en tenant compte des *écartements* calculés précédemment ;

c) Calculer la surface S de la pièce en mètres carrés ;

d) choisir le type d'appareil destiné à l'éclairage, pour aider à la recherche des coefficients u_a et u_b ;

e) Calculer l'indice *u* (à l'aide des tableaux du § 180 ou du § 182), et après calcul préliminaire de l'indice du local *i* (par rapport à *a*, et à *b*) ;

g) choisir le facteur de dépréciation δ, en tenant compte des dispositions spéciales des lieux ; entre 1,2 (conservation assez bonne), et 1,5 (ateliers à poussières) ;

h) choisir l'éclairement, selon le tableau du § 177 ;

j) enfin, calculer le flux d'une lampe ; et choisir le type qui convient.

Voici quelques *exemples* de *projets d'éclairage.*

186. A. **Eclairage d'un atelier de tissage.** — Dimensions de l'atelier : $a = 60$ m. ; $b = 30$ m. ; couleur du plafond : *claire* ; couleur des murs : *assez claire ;* hauteur du plafond : 4 m. au-dessus du sol ; les *machines* sont *éloignées des murs.*

Le mode d'éclairage qui convient à un tel atelier, est l'*éclairage direct* par lampes claires avec réflecteur métallique émaillé blanc (tableau α, du § 180) ; supposons une suspension de 0 m. 75 de hauteur pour les lampes et appareils ;

a) *Calcul de* E : dans cet éclairage direct, nous avons :

$$E = H \times 1{,}50.$$

Or : H = 4 m. — 0 m. 75 — 0 m. 75 (hauteur du plan utile) = 2 m. 50 ; d'où E (*maximum*) $\leqq 2{,}5 \times 1{,}5 = 3$ m. 75 ; et : $D = \frac{E}{2} \leqq 1$ m. 875.

On prendra, pour circuler facilement entre les murs et les machines : E = 3 m. 25 (ce qui donnera un nombre de lampes un peu plus grand, et l'éclairement y gagnera) ; on aura : D = 1 m 62, ce qui est suffisant pour circuler et vérifier les machines.

b) *Calcul de n* ; le nombre de lampes sera : $\frac{a}{E} \times \frac{b}{E} = \frac{60}{3{,}25} \times \frac{30}{3{,}25} = 18{,}4 \times 9{,}2$;

nous prendrons : $19 \times 10 = 190$ lampes.

c) *Calcul de S* : on a immédiatement : $S = ab = 60 \times 30 = 1800$ m².

d) Le *type d'éclairage* a été désigné précédemment (voy. tableau α, § 180).

e) *Calcul de u*; l'indice local vaut (formule 56) : $i_b = \frac{b}{2H} = \frac{30}{2 \times 2,5} = 6$; ce nombre étant supérieur à 5, nous prendrons : $i_b = 5$; d'autre part : $i_a = \frac{a}{2H} = \frac{60}{2 \times 2,5} = 12$; nous prendrons encore $i_a = 5$.

Avec le tableau (α), § 180, nous prendrons, en appliquant la *remarque* du § 181 :

$$u_a = 0,59; \; u_b = u_a = 0,59 \text{ (cas particulier)}.$$

D'où pour l'indice u : $u = u_b + \frac{0}{3} = u_b = 0,59$.

g) Dans une usine de tissage, des *poussières* et des *filaments* se déposent sur les appareils, et atténuent rapidement la valeur du flux lumineux; nous prendrons $\delta = 1,5$.

h) Le tableau du § 177 nous fournit, pour E (ateliers textiles) : 60 à 100; comme un éclairement de bonne qualité est nécessaire avec un travail aussi délicat nous prendrons : $E = 100$ (le maximun) ; d'où enfin, nous aurons :

j) *flux d'une lampe* (à émettre), et en *lumens* (la surface S est en *mètres carrés*) :

$$f = \frac{ES\delta}{nu} = \frac{100 \times 1.800 \times 1,5}{190 \times 0,59} = 2.408 \text{ lumens } 5.$$

Si l'on se reporte aux tableaux des § 115 à 117 (car les lampes à incandescence conviennent particulièrement dans ces sortes d'ateliers à atmosphère présentant des éléments inflammables (filaments de cellulose), et les lampes à arc y seraient d'un emploi dangereux), on voit que ce flux serait fourni par des lampes au tungstène (atmosph. gazeuse), d'une puissance lumineuse *comprise* entre 175 et *200 bougies* ; si l'on veut utiliser des lampes fabriquées couramment *en série* dans l'industrie électrique, il faut choisir une valeur de f qui nous rapproche davantage d'une puissance lumineuse courante : 200 bougies par exemple, correspondant à : $f = 4\,\pi \times 200 = 2.514$ lumens : on adoptera donc des types à 200 b. d. (moyennes sphériques) qui fourniront un éclairement un peu supérieur à 100 lux dans les conditions du projet actuel.

187. B. **Eclairage d'un atelier de montage de machines.** — Dimensions du hall de l'atelier : $a = 120$ m. $b = 24$ m. ; haut. du plafond (ou de la toiture vitrée) au dessus du sol d'usine : 15 m. ; le pont roulant (nécessaire au transport des grosses pièces) est à 10 mètres de hauteur (sur rails) ; à cause de l'encombrement des organes accessoires, de la char-

pente, et des câbles et trolley, on disposera les lampes à 12 m. du sol, nous ferons donc H = 12. Le hall comprend 2 séries parallèles de machines (tours, mortaiseuses, fraiseuses, raboteuses, étaux-limeurs, rectificatrices, etc.), ce qui divise la surface à éclairer dans le sens de la longueur, en 2 grands rectangles égaux de : 120 m. × 12 m.

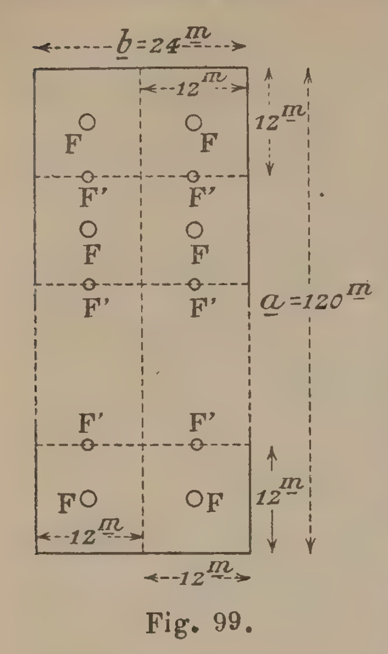


Fig. 99.

De plus les fermes de la toiture sont distribuées tous les 12 m.; on peut donc diviser la surface utile d'éclairement en $\frac{120}{12} \times 2 = 20$ carrés égaux de 12 m. × 12, recevant une lampe au centre (l'éclairement en sera satisfaisant en tous les points ; fig. 99.).

Aspect des *murs* : *sombre*; de la *toiture* : *sombre* (vitrage enduit d'un badigeon bleu pour arrêter les radiations calorifiques du soleil, le jour).

Nous adoptons donc le *système direct*, avec lampes à incandescence claires et réflecteur métallique émaillé blanc, — ou lampes à arc à globe légèrement dépoli et réflecteur (nous prendrons donc encore le tableau α du 180).

Nous pouvons, dans le cas présent, appliquer la formule 59 : $f = \frac{Es\delta}{u}$.

Nous prendrons ici : $E = 40$ lux (ateliers de grosse mécanique); $\delta = 1{,}3$ (faible dépréciation dans un tel atelier où les poussières, rares d'ailleurs, n'atteignent par les appareils) ; nous avons déjà :

$$s = 12 \times 12 = 144.$$

Calculons u. Nous avons successivement :

$$i_a = \frac{a}{2H} = \frac{120}{2 \times 12} = 5; \qquad i_b = \frac{b}{2H} = \frac{24}{2 \times 12} = 1;$$

d'où (tableau α) : $u_a = 0{,}57$; $u_b = 0{,}38$; et : $u = 0{,}38 + \frac{0{,}57 - 0{,}38}{3} = 0{,}44$;

et par suite $f = \frac{40 \times 144 \times 1{,}3}{0{,}44} = 17.018$ lumens; nous prendrons 17.000.

Le nombre de foyers sera : $n = \frac{S}{s} = \frac{120 \times 24}{12 \times 12} = 20.$

D'après les tableaux des §§ 115 à 117 (incandescence), l'on disposera des lampes (20) de 1.000 bougies (moyennes sphériques), aux points F indiqués, et autant de lampes (20 également) de 200 bougies, sur les *fermes*, et au milieu F′ des intervalles de 2 grosses lampes. On obtiendra ainsi : $4\pi \times 1.200 = 15.000$ lumens; ce qui diminuera l'éclairement dans le rapport : $\frac{2}{17} = 0{,}12$; mais il vaudra encore $40 \times 0{,}88 = 35$ *lux*, (supérieur à 30, limite inférieure admise), donc il sera acceptable.

188.— C. Eclairage d'une grande salle de dessin.— Dimensions : hauteur $=5$ m.; $a=42$ m.; $b=12$ m.; plafond et mur *clairs* (pour le travail pendant le jour) ; donc nous adopterons le système *semi-indirect*, avec types d'appareils du *tableau* ε.

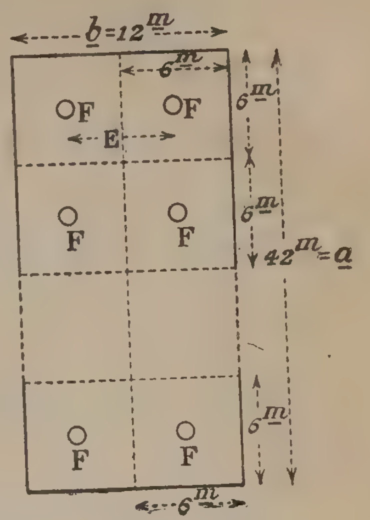


Fig. 100.

Là encore, à cause de la symétrie des tables de dessin, on divise la salle en 2 rectangles (dans le sens de la longueur), et chacun en 7 carrés (parallèlement à la largeur) ; dans chaque carré, ou aura une surface à éclairer : $s=6$ m. $\times$ 6 m. $=36$ m^2 ; nous prendrons encore la formule (59) :

$$f=\frac{Es\delta}{u}.$$

Nous poserons : $E=120$ (voy. tableau § 177) ; $\delta=1{,}25$ (*pas de poussières*) ; calculons H et u. — Hauteur des tables de dessin : 0 m. 90 ; hauteur du *plafond* (dans ce cas d'éclairage *semi-indirect*) au dessus des tables : 5 m. — 0 m. 90 ; $=4$ m. 10 ; donc $=\mathrm{H}=4{,}10$. D'où : $\mathrm{E}\leq 1{,}5\times 4{,}1=6{,}15$; et nous voyons (fig. 100) qu'il a été pris égal à 6 m., ce qui concorde très bien avec ce dernier résultat ; on aura : $\mathrm{D}=\frac{\mathrm{E}}{2}=3$ m., ce qui est suffisant.

On a : $n=\frac{a}{\mathrm{E}}\times\frac{b}{\mathrm{E}}=\frac{42}{6}\times\frac{12}{6}=14.$

Calculons u. Or, on a : $i_a=\frac{a}{{}^4/_3\mathrm{H}}=\frac{42}{5{,}5}=7{,}6$ (nous prendrons 5) ;

$i_b=\frac{b}{{}^4/_3\mathrm{H}}=\frac{12}{5{,}5}=2{,}18$; nous prendrons 2,2.

Le tableau ε, nous donne : $u_a=0{,}50$; $u_b=0{,}41$;

d'où : $u=0{,}41+\frac{0{,}09}{3}=0{,}44.$

Portons ces nombres dans (59) :

il viendra : $f=\frac{120\times 36\times 1{,}25}{0{,}44}=12.272{,}7$ lumens ; correspondant à 1.000 bougies environ (il faudrait exactement 977 b.d. sphériques) ; l'éclairement sera *un peu augmenté* (de moins de $2\frac{1}{2}$ %). Donc on prendra des lampes au tungstène de 1.000 bougies nominales (500 *watts*).

189. D. Eclairage d'un Laboratoire industriel (*chimie*). — Dimensions : hauteur $=5^{\mathrm{m}}$; $a=25^{\mathrm{m}}$; $b=20^{\mathrm{m}}$; *tables* à 1^{m} du sol ; *plafond* clair et murs *sombres* ; nous adopterons l'*éclairage direct*, par lampes à *ampoules opalines*, qui diffusent *bien la lumière* et qui conviennent tout spécialement pour un laboratoire de chimie (tableau δ ; § 180) ; longueur de suspension des foyers : $0^{\mathrm{m}}35$; d'où : $\mathrm{H}=5-1-0{,}35=3^{\mathrm{m}}65$; d'où :

$E \leqq 1,5 \times 3,65 = 5,47$; nous prendrons 5 ; on aura (des tables de travail sont disposées le long des murs) : $D = \frac{E}{3} = \frac{5}{3} = 1^m66$, ce qui suffit amplement. $S = 25 \times 20 = 500^{m2}$.

Nombre de lampes : $n = \frac{a}{E} \times \frac{b}{E} = \frac{25}{5} \times \frac{20}{5} = 20$ lampes. Nous prendrons $E = 100$ lux (nécessaire pour juger les opérations, faire les pesées et les lectures); on a : $S = 25 \times 20 = 500$ m. carrés. Calculons u; on a : $i_a = \frac{25}{7,3} = 3,4$; $i_b = \frac{20}{7,3} = 2,7$.

Nous avons (tableau δ) : $u_b = 0,54$; $u_a = 0,58$; d'où : $u = 0,54 + \frac{0,04}{3} = 0,55$.

Nous prendrons $\delta = 1,5$ (à cause des vapeurs, gaz de toutes natures, qui déprécient sensiblement les appareils) ; et nous aurons (form. 58) :

$$f = \frac{E S \delta}{n u} = \frac{100 \times 500 \times 1,5}{20 \times 0,55} = 6818,2 \text{ lumens.}$$

Nous prendrons 20 lampes de 600 *bougies nominales* donnant 6.940 *lumens* (Philips-argenta ; ou Mazda-émail) ; ce qui augmentera l'éclairement dans le rapport : $\frac{122}{6.818} = 0,018$; soit de moins de 2 %, ce qui ne nuira pas à l'effet obtenu.

190. E. **Eclairage d'une salle d'étude.** — Dimensions : $a = 20$ mètres; $b = 12^m$; hauteur du plafond : $h = 3^m75$; *système indirect* (lampe claire et réflecteur émaillé au-dessous ; tableau α) ; *plafond* et *murs clairs*.

Tables-bureaux à 0^m75; lampe près du plafond, à 0^m65; d'où : H (hauteur du plafond dans ce cas) $= 3^m75 - 0^m75 = 3^m$; et : $E \leqq 1,5 \times 3 = 4,5$; nous prendrons : $E = 4$.

On aura : $n = \frac{a}{E} \times \frac{b}{E} = 5 \times 3 = 15$ lampes; nous prendrons : $E = 50$ lux.

On a : $S = 20 \times 12 = 240^{m2}$; nous prendrons : $\delta = 1,3$ (poussières simples). Calculons u.

On peut écrire : $i_a = \frac{a}{{}^4/_3 H} = \frac{20}{4} = 5$; $i_b = \frac{12}{4} = 3$; le tableau α donne :

$u_a = 0,60$; $u_b = 0,56$; et : $u = 0,56 + \frac{0,04}{3} = 0,57$. D'où :

$f = \frac{50 \times 240 \times 1,3}{15 \times 0,57} = 1.824,5$ lumens; on prendra des lampes au tungstène (gaz), type Mazda de 100 watts (1.600 lumens); ce qui ramènera l'éclairement à : $E = \frac{1.600}{1.824} \times 50 = 44$ *lux*, nombre acceptable.

191. F. Salon d'appartement. — Dimensions : $a = 8^m$; $b = 6^m$; hauteur $= 3^m75$; nous supposerons toutes les surfaces à éclairer situées à 0^m75 du plancher; nous adopterons l'*éclairage direct*, mais avec des appareils formés de *lampes claires* avec *coupe holophane* : (tableau η ; §. 180). Plafond et murs : *clairs* ; suspensions des lampes à 0^m50 du plafond, d'où : $H = 3,75 - 0,75 - 0,50 = 2^m50$. D'où : $E \leq 1,5 \times 2,50 = 3,75$; on prendra : $E = 3$. Il viendra : $n = \frac{a}{E} \times \frac{b}{E} = \frac{8}{3} \times \frac{6}{3} = 5,33$: nous prendrons $n = 5$.

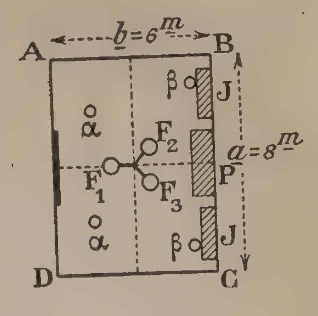


Fig. 101.

Adoptons : $E = 35$ lux ; on a : $S = 8 \times 6 = 48^{m2}$; nous fixerons : $\delta = 1,25$ (bon entretien de la pièce). Calculons u. On a : $i_a = \frac{8}{5}$; $= 1,6$ $i_b = \frac{6}{5} = 1,2$; le tableau η donne : $u_a = 0,28$; $u_b = 0,24$; d'où : $u = 0,24 + \frac{0,04}{3} = 0,25$.

On aura ainsi : $f = \frac{35 \times 48 \times 1,25}{5 \times 0,25} = 1.680$ *lumens* : on choisira des lampes de 125 b. d. nominales (tungstène en atm.-inerte) qui répondent à la question.

Mais dans un éclairage de ce genre, l'on tient en général beaucoup moins à la répartition uniforme des foyers qu'à une distribution qui mette en lumière le centre de la pièce, avec éclairage un peu atténué aux angles.

On pourra répartir les 625 bougies que nous venons de trouver, en 425 bougies au centre (avec plafonnier en $F_1F_2F_3$), et 200 bougies pour les angles, soit 4 lampes (α, β) de 50 bougies ; en les disposant comme sur la fig. 101, en écartant davantage les lampes β, situées du côté des 2 lampes F_2F_3 qui donnent plus d'éclairement du côté BC où se trouvent par exemple le piano P, et les tables de jeux J. Il est *facile de vérifier* que, dans ces conditions, l'éclairement en tous points de la pièce est très satisfaisant ; aux points A et D, les moins favorables, il est supérieur à 25 lux ; aux points favorisés B et C, il vaut environ 35 lux ; les points les plus fortement éclairés sont dans l'intérieur de la périphérie des lampes.

192. G. Eclairage d'un square ou d'une place publique. — Dimensions : $a = 150$ m. ; $b = 75$ m. ; nous prendrons (§ 176) $H = 5$m. afin de bien éclairer les parterres et les massifs. Les lampes employées sont des lampes à arc à globe opalin, ou des lampes au tungstène gaz à ampoule opaline (tableau du § 182) ; nous aurons, pour l'écartement des foyers : $E = 8 \cdot H = 40$ m. Nous adopterons : $E = 6$ lux (maximum).

Calculons u. On a : $i_a = \frac{a}{2H} = \frac{150}{10} = 15$ (on prendra : 5) ; $i_b = \frac{b}{2H} = \frac{75}{10} = 7,5$ on prendra encore : 5) ; d'où : $u_a = u_b = 0,55 = u$.

Le nombre des lampes sera : $n = \frac{a}{E} \times \frac{b}{E} = \frac{150}{40} \times \frac{75}{40} = 7{,}03$; on prendra 8 lampes (à un premier essai) ; on a : $S = 150 \times 75 = 11.250^{m^2}$; $\delta = 1{,}75$ (dépréciation *très spéciale* pour les *lampes extérieures*) ; d'où l'on déduit : $f = \frac{E S \delta}{nu} = \frac{6 \times 11.250 \times 1{,}75}{8 \times 0{,}55} = 26.846$ lumens 6; ce flux est trop puissant pour des foyers uniques; il correspond à des lampes de 2.148 *bougies* sphériques ; la solution à adopter sera la suivante (fig. 102) : on disposera, aux 8 points désignés par F, des lampes de 2.000 bougies (*arcs*, lampes Bardon du type ε, § 154 avec courant alternatif; ou du type β, § 147, avec le courant continu), ou *tungstène* en *gaz inerte* à 1.000 watts) ; et l'on complétera par 8 lampes de 125 bougies chacune (types à 100 watts), disposées en F′ sur la figure, si le centre de la place ou du square est occupé par un monument ou une pièce d'eau. Les éclairements seront ainsi très bien répartis sur le pourtour des plates-bandes ou massifs.

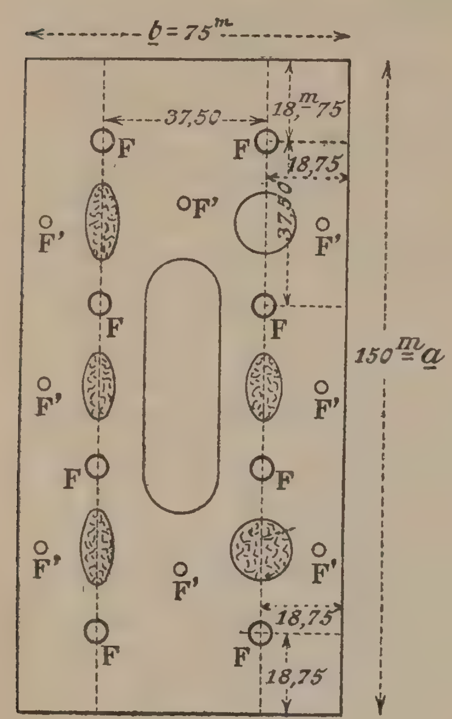


Fig. 102.

N. B. — Le choix de $n = 8$ (au lieu de 7), impose un écartement E un peu plus faible : 37m50 avec D = 18m75 (fig. 102).

193. Remarque générale. — Nous avons dit comment les lampes (à incandescence ou à arc) étaient reliées à un réseau, et les organes de commande et de sécurité qu'elles comportaient; nous n'avons rien de plus à ajouter ici, puisque l'emplacement des lampes, déterminé par un projet du genre de ceux qui précèdent, n'a rien à modifier aux conditions d'installation séparée de chacune d'elles.

Il appartient à l'ingénieur chargé de la canalisation électrique destinée à ces foyers lumineux, de choisir le raccordement du, ou des groupes, au réseau général, pour économiser autant que possible la dépense en câbles.

194. Enseignes lumineuses. — Nous avons dit qu'on les réalise avec les *tubes à néon* et à *néon-mercure* ; ces tubes sont disposés de façon à mettre *en valeur les façades des édifices* (salles de spectacte, musées, etc.); le goût seul, et l'examen des détails permettent de déterminer l'emplacement des tubes, sans avoir à obéir à aucune autre règle d'installation. Il en est de même pour les enseignes et les réclames, placées sur les toits ou le haut des façades, afin de ne gêner en rien l'éclairage ordinaire des voies publiques. On dispose aussi des *enseignes* lumineuses avec lampes à incandescence, en groupant celles-ci pour réali-

ser des lettres. On admet, pratiquement, que le *maximum de distance* pour la visibilité de telles lettres est égale à 500 m. Une lettre réalisée avec des lampes de 10 b. d. (16 lampes pour la lettre N, par exemple) est nettement visible à 200 mètres : la lettre est nette, et la *vision non troublée.* Avec des lampes de 75 b. d. (au lieu de 10 b. d.) et à la même distance de 200 m. les lettres sont *troubles* (il y a fatigue de l'œil, sans doute par éblouissement); elles paraissent *plus grosses*, mais *diffuses.* Il ne faut pas chercher à accroître au-delà de 200 m. (l. de 10 b. d.) et de 400 m. (lampes de 50 b. d.), la distance de vision.

195. **Comparaison de la dépense de courant avec les types de lampes.** — Pour fixer la situation actuelle de l'éclairage par incandescence et par arc, nous donnons ci-après la consommation en watts nécessaire aux bornes d'une lampe pour la production de *100 bougies sphériques* (ou d'un flux de *1.250 lumens*), ceci dans l'ordre d'*économie croissante* (en considérant le *courant continu* ; mais nous indiquerons, en *face de chaque type*, la dépense en courant alternatif).

		EN COURANT CONTINU			EN COURANT ALTERNATIF		
a. Lampes à incandescence	Charbon (ordinaire) :	297 à	300	watts		420	watts
	Charbon (grapbité) :	243	233	»	340 à	325	»
	Nernst :		130	»			»
	Tungstène (vide) : ou gaz (ampoule opaline)		110	»	120	115	»
	Tungstène (gaz) : (amp. claire)	80	75	»	85	80	»
b. Lampes à arc	Néon :		»	»	70	60	»
	Arc (charb. ordin.) :	65	60	»	80	75	»
	Arc (vase clos) :	45	40	»		50	»
	Mercure (amp. verre) :		45	»			»
	Arc (flamme) :	30	25	»	38	30	»
	Mercure (amp. quartz) :		25	»			»

N. B. — A partir de *600 bougies* (intensité pour laquelle les lampes au tungstène (gaz) fournissent le même flux lumineux que les lampes à arc courantes), la dépense des premières tombe entre 52 et 50 watts ; leur place est alors entre l'arc (charb. ordin.) et l'arc (vase clos). Disons encore que, malgré leur *consommation spécifique moindre*, les lampes à arc nécessitent le remplacement des charbons (toutes les 100 ou 150 heures), un examen fréquent des régulateurs, et un nettoyage non moins fréquent, ce qui *augmente leur prix de revient* à l'unité lumineuse.— Connaissant le tarif (au *kilowatt-heure*) de l'énergie électrique sur le réseau d'alimentation, il est facile de traduire en *francs*, les nombres qui précèdent, et de juger *à priori* de la dépense d'une installation, au mois, et à l'an, connaissant le régime de fonctionnement des appareils d'éclairage.

Remarque. — Pour permettre la comparaison avec le gaz à incandescence (système Denayrouze, le plus économique), et avec l'acétylène, disons que 100 bougies décimales-heure dépensent actuellement, avec le *premier brûleur* : 150 l. de gaz; et avec le *second* : 58 l. d'acétylène (provenant du carbure de calcium, traité par l'eau froide).

CHAPITRE III

TUBES A VIDE

(LUMINESCENTS ; ET NON LUMINESCENTS)

196. Nous avons défini la luminescence (§ 19), et nous avons décrit les tubes à luminescence présentant un *éclat suffisant* pour être utilisés à l'éclairage électrique (tubes à vapeur de mercure ; tubes à azote, à néon), et nous avons indiqué les conditions de leur fonctionnement.

Nous allons maintenant décrire des tubes où le *vide* est *beaucoup plus grand* et qui fournissent ; une *luminescence* (tube de Geissler, de Plucker), une *fluorescence* (tubes de Crookes), ou demeurent *sombres* (tubes de Coolidge) ; et nous donnerons leurs applications usuelles.

197. *a*) **Tube de Geissler.** — Il renferme un gaz raréfié, et est pourvu de 2 électrodes en fil de platine, soudées au verre et pénétrant de 1 cm. environ à l'intérieur.

Ce tube est pourvu, ou non, d'étranglements sur sa longueur (fig. 103). Quand la pression du gaz est de 1 à 2 cm. de mercure, et qu'on relie

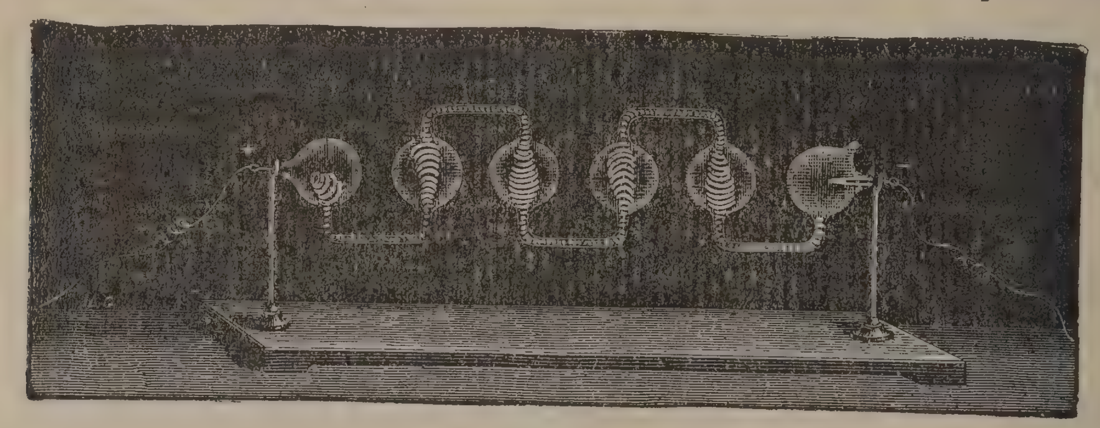


Fig. 103.

les électrodes aux bornes de la bobine secondaire du *transformateur Ruhmkorff* (voy. *Traité d'Electricité*, tome I ; par H. Pécheux. Delagrave, Editeurs), on obtient une luminescence uniforme dans toute l'étendue du tube. Nous avons dit comment on distinguait les pôles (+ et —) du tube (§ 19), et à quoi servait cette distinction pratiquement.

Avec une pression de quelques dixièmes de millimètre, on obtient

une luminescence vive et homogène dans les étranglements du tube (où la décharge passe plus difficilement, donc avec une plus grande chute de tension) ; dans les portions plus larges, on obtient des stratifications : bandes alternantes brillantes et obscures ; elle varient de couleur et d'éclat avec la nature du gaz, la pression, les dimensions du tube. Avec du gaz carbonique à une pression de $\frac{1}{4}$ de millimètre, on a des stratifications verdâtres ; elles sont jaune-rouge avec l'azote; blanches dans les boules extrêmes du tube, et rouges dans les étranglement, avec l'hydrogène.

Si le tube est en *verre d'urane*, on obtient une *fluorescence* verdâtre du tube.

198. *b*) **Tube de Plücker.** — C'est un tube de Geissler renfermant un gaz, sous la pression de quelques dixièmes de millimètre, pour en étudier le spectre (analyse des gaz) : on peut ainsi observer les raies des

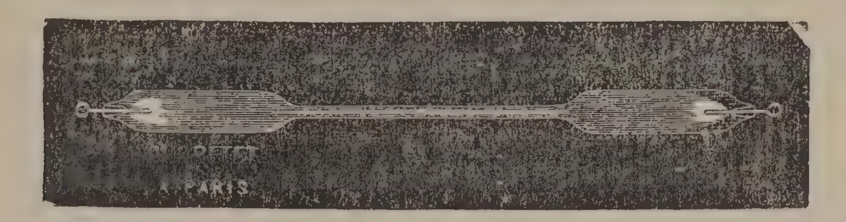


Fig 104.

gaz : H; O; Az; CO; CO^2; Cl; CAz; AzH^3; Az^2O; CH^4; SO^2; des vapeurs raréfiées d'Iode, de brôme, d'anhydride hypoazotique ; de pétrole ; d'eau.

Le tube est capillaire avec 2 ampoules cylindriques aux extrémités, et les 2 électrodes en platine habituelles; le tube capillaire est entièrement luminescent sous la décharge de la bobine de Ruhmkorff.

199. *c*) **Tube de Hittorff.** — C'est un tube de Geissler à vide *voisin de 1 micron* : il ne se produit *plus* de *luminescence* par la décharge.

Applications. — Outre leur application à l'analyse spectrale, ces tubes servent *d'indicateurs du vide*, dans les conditions que nous avons exposées (construction des lampes à incandescence). Nous indiquerons comment on détermine la pression d'un gaz raréfié dans ces tubes, — lesquels servent, ensuite, à vérifier *par comparaison*, le vide des ampoules électriques. (Voy chapitre IV).

200. *d*) **Tube de Crookes.** — **1° Construction et fonctionnement.** — Il est en forme de ballon sphérique (fig. 105) terminé par une tubulure cylindrique et une autre tubulure latérale perpendiculaire à la première. Il est pourvu de 2 électrodes principales, en platine : l'anode (en haut), la cathode (dans la tubulure verticale inférieure), maintenues par tiges de platine soudées au verre, et pourvues extérieurement de crochets

(pour relier à la *bobine de Ruhmkorff* ; la tubulure latérale a servi à faire le vide; une 2e anode (dite : anticathode, reliée en permanence à l'anode) est inclinée de 45° sur l'axe commun des électrodes. Le vide a été fait à 4 ou 5 microns (avec une pompe à huile rotative). La décharge ne fournit *plus de luminescence*, mais l'on voit une fluorescence verte du verre, en face de l'anticathode, avec *espace obscur* entre les électrodes, et dans toute l'ampoule. La température atteinte est de 200° environ seulement.

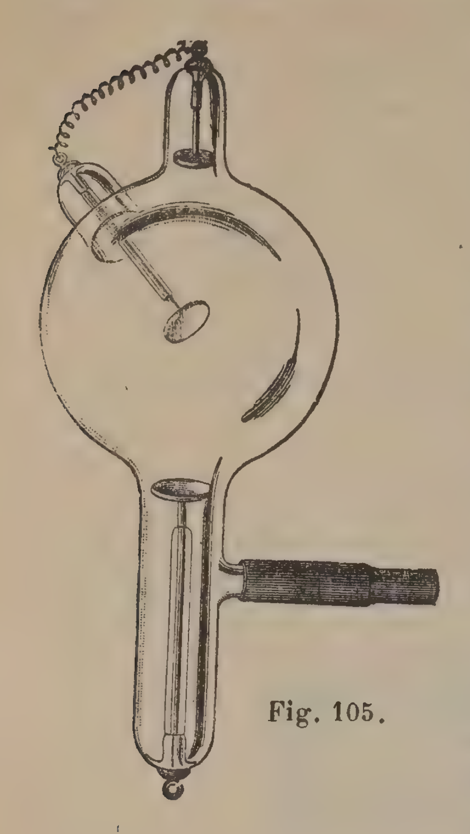


Fig. 105.

La cathode émet, pendant la décharge, des *rayons invisibles* (rayons cathodiques) à la vitesse de 5×10^4 à 6×10^4 kilomètres-seconde. Ces rayons sont déviés par un champ magnétique : on peut ainsi voir dévier la région fluorescente à l'aide d'un aimant. La fluorescence du tube est due au *bombardement* du verre par des rayons cathodiques secondaires (émis par l'anticathode) de vitesse considérable, qui ne traversent pas le verre ; ils traversent l'aluminium (on constate toujours la fluorescence du verre en interposant à l'avance une plaque d'aluminium sur leur trajet, à l'intérieur de l'ampoule) ; ces rayons sortant de la cathode, se réfléchissent sur l'anticathode, et se dirigent ainsi perpendiculairement à l'axe du tube, ce qui explique la *position de la fluorescence*. Les rayons cathodiques ont une charge *d'électricité négative* (M. J. Périn).

Si la cathode est percée de trous, elle laisse passer derrière elle, en sens inverse des rayons cathodiques, des rayons *chargés positivement* (rayons-canal); ils sont formés de corpuscules ayant la masse des atomes chimiques, tandis que les rayons cathodiques (négatifs) sont formés *d'électrons*, dont la masse est environ 1.000 fois plus faible que celle des rayons positifs. Les rayons cathodiques (réducteurs) réduisent avec le temps, le sel de plomb entrant dans la constitution du verre de l'ampoule, lequel noircit dans les tubes usagés ; ils renferment donc de l'hydrogène.

On explique la présence de cet hydrogène par celle de l'eau laissée sur la paroi de l'ampoule, malgré le vide, et qui s'est *ionisée* sous l'influence de la décharge. Si l'on fait le vide dans un tube de Crookes avec du *mercure bouillant* (ce qui élimine toutes traces d'eau), il n'y a plus d'émission cathodique.

201. 2°) **Mécanisme de l'émission cathodique.** — Le faisceau cathodique est constitué principalement par les *électrons* arrachés au métal de la cathode par le *bombardement* de l'afflux, sur cette cathode, *d'ions po-*

sitifs ayant acquis une vitesse considérable dans ce vide (voisin de celui d'un tube d'Hittorff) ; on donne à cet afflux le nom d'afflux cathodique (l'expérience montre bien son existence quand on perce la cathode, comme nous l'avons dit précédemment ; il forme alors les rayons-canal)

Il est donc *nécessaire*, pour que cet afflux se produise, — et par suite qu'il y ait corrélativement émission cathodique, — qu'il existe dans le tube des molécules gazeuses (de vapeur d'eau, par exemple), pour que les ions positifs puissent exister : la quantité de gaz du tube régit donc l'émission cathodique. Si le vide est *élevé* (*faible quantité* de gaz) l'afflux est *faible;* et dès lors, malgré une grande différence de potentiels de décharge, il y a production d'une faible émission d'électrons à la cathode, et le faisceau sera peu intense ; si, au contraire, le vide est *peu élevé*, il y aura un afflux cathodique plus abondant, une émission cathodique d'électrons abondante elle-même, nécessitant une tension de décharge moindre. Les *chocs* des électrons cathodiques contre les molécules gazeuses seront d'autant plus répétés qu'il y aura plus de gaz (vide moins élevé), et ces chocs ralentiront la vitesse du faisceau ; dans ce cas, on aura un faisceau intense, mais relativement lent ; il sera peu intense, et rapide, dans le cas contraire.

202. *e*) **Rayons X.** — 1° *Propriétés.* — Les rayons cathodiques sont accompagnés de rayons qui ont des propriétés différentes des premiers (rayons X) (1) : ils traversent le verre (donc, *sortent de l'ampoule*), et se manifestent à l'extérieur par quelques caractères aisés à mettre en évidence : ils rendent phosphorescents (dans un *cabinet noir*), un écran recouvert de platino-cyanure de baryum ; ils réduisent les sels d'argent (bromure, iodure) ; ils traversent le papier, le bois, la peau, le cuir (moins facilement que la peau), les os (moins facilement encore), l'eau, le verre, le celluloïd, les métaux de faible densité (magnésium, aluminium), mais ne traversent pas facilement les *métaux lourds* (étain, or, platine, tungstène) et *pas du tout le plomb*, qui servira *d'écran à ces rayons.*

Il existe des rayons X de *plusieurs sortes* ; ils ne traversent pas tous également les substances qui précèdent.

Les rayons X ne peuvent être ni réfléchis, ni réfractés, ni diffractés ; ils ne sont *pas déviés* par un champ magnétique (contrairement aux rayons cathodiques) ; mais ils *ionisent* les gaz, et par suite déchargent les corps électrisés (sans posséder cependant aucune charge électrique.)

Les rayons X semblent se placer entre les rayons *calorifiques* et les rayons *lumineux* ; en effet, le *spectre* des rayons X (dont *l'intensité* est d'autant plus grande que le *potentiel* de décharge est plus élevé) s'étend entre les longueurs d'onde : 0 micron 000,005 (rayons *très pénétrants*), et 0μ0012 (rayons *peu pénétrants*) tandis que le spectre calorifique s'étend

(1) Les rayons X sont engendrés par le choc des corpuscules cathodiques sur l'anticathode.

de 30μ (au-delà de *l'infra-rouge*) à 0μ8 (extrémité du spectre visible) ; et le spectre lumineux, quant à lui, va de la longueur d'onde : 0μ8 (rouge) à 0μ4 (violet), et jusqu'à : 0μ016 (extrême ultra-violet) ; de sorte que, pour nous *résumer*, et si nous remarquons que la vitesse de propagation V des rayons X est la même que celle de la lumière, la formule connue : $V = n\lambda$, nous montre que : la longueur d'onde des rayons X étant *très faible* vis-à-vis de celle des rayons lumineux, la fréquence, ou nombre des vibrations par seconde n pour les *premiers* est *trop considérable* vis-à-vis du nombre des vibrations lumineuses pour *affecter la rétine*. (La fréquence des rayons X $\left(f = \frac{V}{\lambda}\right)$ n'est pas autre chose que le nombre des vibrations par seconde).

L'action *calorifique* des rayons X est manifestée par des effets de *brûlure* amenant, avec leur pratique habituelle, des accidents mortels chez ceux qui opèrent avec le tube de Crookes, sans prendre la précaution de s'en protéger convenablement. — Avec un écran de plomb, de 5 mm. d'épaisseur au moins, les dangers sont tolalement écartés.

La *matière* émet des électrons quand elle est *irradiée* par les rayons X; et ceci, avec *toutes les vitesses*.

La vitesse maxima des électrons : v, leur masse m, leur charge électrique ε sont liées à la fréquence f des rayons X, au potentiel appliqué : U, et à la constante de Planck : h, par la relation : (60)

$$\frac{1}{2} m v^2 = U\varepsilon = hf. \qquad (60)$$

Il y a, en outre, une *émission spéciale* associée à la radiation X, et caractéristique de la matière irradiée : elle est formée de groupes d'électrons ayant des *vitesses plus faibles* ; leur émission est dûe à un effet secondaire, sous l'action des électrons rapides (De Broglie ; Scherrer).

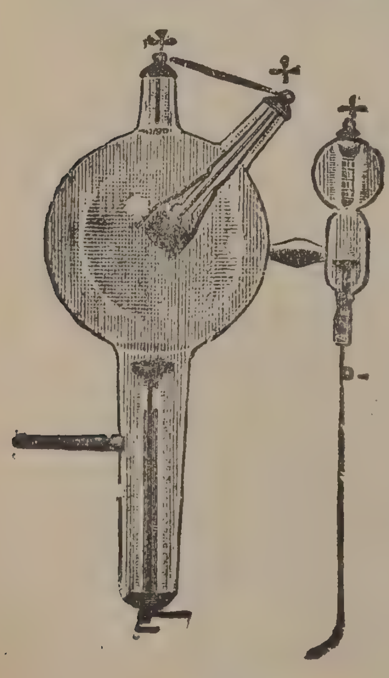


Fig. 106.

2° *Intensité des rayons X*. — Un faisceau cathodique *intense*, mais *lent* — cas d'un vide *moins élevé*, donc de la présence d'une plus grande quantité de gaz dans l'ampoule, — produira des rayons X *intenses*, mais *mous* (c'est-à-dire *peu pénétrants*, de *plus grande longueur d'onde* : 0μ0012) ; et un faisceau cathodique peu intense, mais *rapide* (vide élevé), donnera des rayons X *peu abondants*, mais *durs* (très pénétrants ; de longueur d'onde *plus faible* : 0μ,000.005).

On tend, dans la pratique, à faire produire des *rayons durs* ; alors les gaz disparaissent peu à peu, et l'on atteint bientôt le vide de Hittorff : le tube ne fonctionne plus.

On a *perfectionné* le tube de Crookes dans le but d'obvier à cet inconvénient ; une petite ampoule auxiliaire (fig. 106) est soudée au tube principal, et communique avec lui par un étranglement commandé par un globule de mercure formant soupape ; cette petite ampoule renferme un peu plus de gaz que la grande (le vide y a été moins poussé) ; quand le tube principal est devenu *dur* (après un certain temps de fonctionnement) et que la décharge ne peut plus franchir l'espace entre anode et cathode, une étincelle jaillit dans le petit tube, dont l'atmosphère s'échauffe, et une partie de son gaz passe par l'étranglement dans le gros tube, qui devient alors *plus mou*, et fonctionne de nouveau.

Un *autre perfectionnement* a été apporté à ces tubes, en réalisant une anticathode avec de *l'uranium* ou du *thorium* pur et cohérent, ou un alliage de ces métaux ; l'anticathode résiste plus longtemps au fonctionnement du tube, que celle de platine.

3° *Applications à la radiologie*. — On dispose le tube (dit *tube focus*) comme l'indique la fig. 107, après avoir répéré sur la bobine de

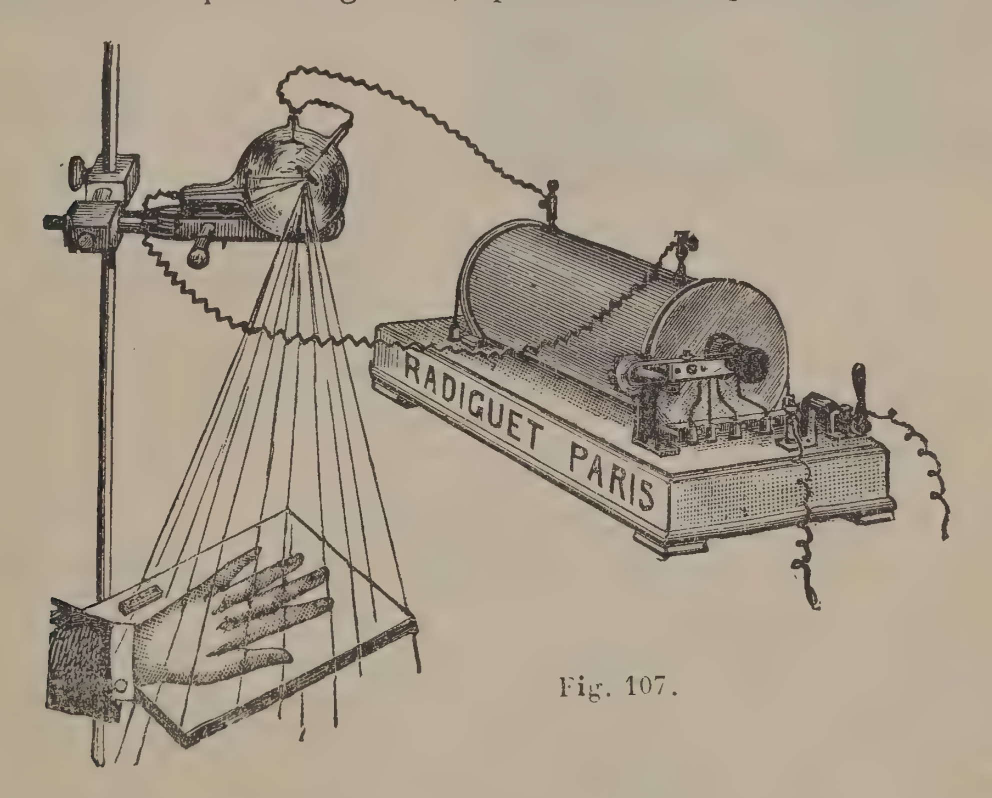


Fig. 107.

Ruhmkorff, l'électrode positive à l'aide d'un tube de Geissler (nous avons dit comment au § 19) ; on fait donc les liaisons nécessaires, à l'anode et à la cathode ; l'objet à radiographier (une main par exemple) est disposée en face de la partie fluorescente du tube (là où sortent les rayons X), et sur un chassis photographique ordinaire renfermant une plaque sensible au bromure d'argent, enveloppée de papier noir ; si l'on dispose d'une tension secondaire correspondant à 15 cm de longueur d'étincelle à l'air, le châssis après quelques secondes d'exposition aux rayons X, sera impressionné ; on le révélera en chambre photographique (à la lumière rouge) ; le négatif obtenu donnera l'aspect de la

fig. 108 : les os (*moins perméables*) seront en teinte plus claire ; la chair et la peau (plus perméables) seront en teinte sombre ; un positif fait ensuite, *inversera* les teintes, comme on sait : os plus sombres, chair plus claire.

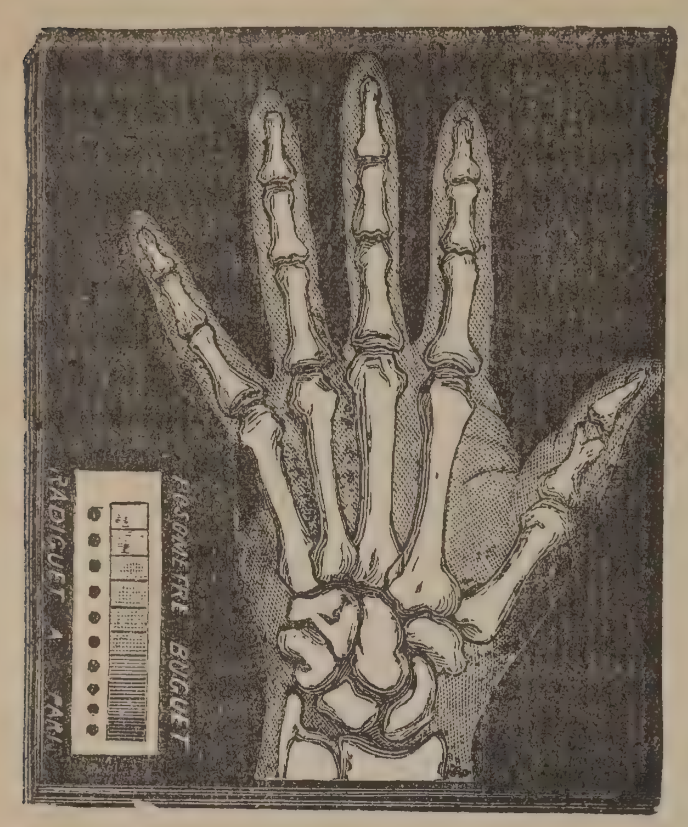


Fig. 108.

La *radiographie* permet donc, par l'obtention d'une photographie, de révéler dans un organe du corps humain, la présence d'un projectile (tache sombre), ou d'une *tumeur* (tache moins sombre) ; des tubercules du poumon (taches claires) ; elle rend ainsi des services incomparables à la médecine et à la chirurgie. Une échelle permet de trouver la position exacte du projectile sur le cliché, et d'aider le chirurgien à diriger son opération. — La *radioscopie* permet l'examen (sans photographie) d'un organe quelconque en interposant cet organe entre la partie fluorescente de l'ampoule et un écran au platino-cyanure de baryum : sur lequel on voit se dessiner des ombres de teintes plus ou moins claires, selon la différence de perméabilité des tissus de l'organe.

203. *f*) **Tube de Coolidge.** — 1° **Principe.** La *vie* d'un tube de Crookes est donc limitée, nous l'avons montré, et d'autant plus qu'on l'a davantage poussé pour lui faire fournir des rayons durs, rayons que l'on recherche de plus en plus.

Le *tube de Coolidge* fournit de tels rayons, avec une durée de fonctionnement bien supérieure ; mais il repose sur une *principe différent.*

Dans un tel tube, le vide est *très grand;* à tel point que le nombre de molécules gazeuses disséminées dans l'ampoule (2×10^{12} par centimètre cube) est inférieur à celui du tubes de Crookes (2×10^{14} par cm. cube (1); de sorte que ces molécules n'*interviennent plus* dans la *formation* du faisceau cathodique, il *n'y a plus afflux d'ions positifs* sur la cathode).

Mais la cathode est *portée à* l'*incandescence*, par un *système de chauffage indépendant*; et nous avons montré que, *dans* ces *conditions*, il y avait *émissions d'électrons* par la cathode ; nous avons expliqué ce phénomène au § 39, en considérant le tungstène (qui est précisément le métal employé comme cathode.

(1) Il y a 3×10^{19} molécules gazeuses, par centim.-cube, à la pression de 1 atmosphère.

Nous avons vu, — et la fig. 19 le montre bien, — que : l'intensité du *courant électronique* obtenu entre la cathode et l'anode dépend, à la fois, de la tension électrique entre les électrodes, pour une température donnée de la cathode; et que, si la température s'élève (chauffage plus intense), l'intensité du courant électronique croît encore. Mais, pour une *température donnée*, le courant électronique croît jusqu'à une certaine limite (*saturation*; voyez fig. 19), à partir de laquelle il demeure constant, quelle que soit la tension appliquée entre les électrodes, à partir de celle qui a fourni ce courant de saturation.

Il en résulte que l'intensité du faisceau de rayons X (1), étant liée à celle du faisceau cathodique, — qui est représentée par l'intensité du courant électronique, — sera donc dépendante, elle aussi, de la température et de la tension électrique.

De plus aucun bombardement (dû à l'afflux d'ions positifs, dans le tube de Crookes) ne se produisant à la cathode, celle-ci demeurera à *température constante*, pour une tension électrique donnée, et un chauffage bien réglé de la cathode. — Le tube de Coolidge est utilisé spécialement pour la *Radiographie*.

204. 2° **Construction.** — La cathode est formée par un filament de tungstène enroulé en spirale plate, et relié à une *source* de *courant* qui le porte à l'incandescence par 2 fils qui sont soudés au verre du tube; ces fils sont connectés à un *culot à vis* (comme dans les lampes à incandescence de ce type) qui permettra de fixer sur une douille à vis, en relation avec le courant de chauffage (fig. 109); l'*anode* (qui est aussi appelée *anticathode*) est en *tungstène* également, en forme de *disque* ou de *bloc massif* de 2 cm. de diamètre selon les types; quelquefois, le disque est enchassé dans du cuivre; le disque (ou la masse) est supporté par une tige de molybdène (partie inférieure du tube sur la figure 109.)

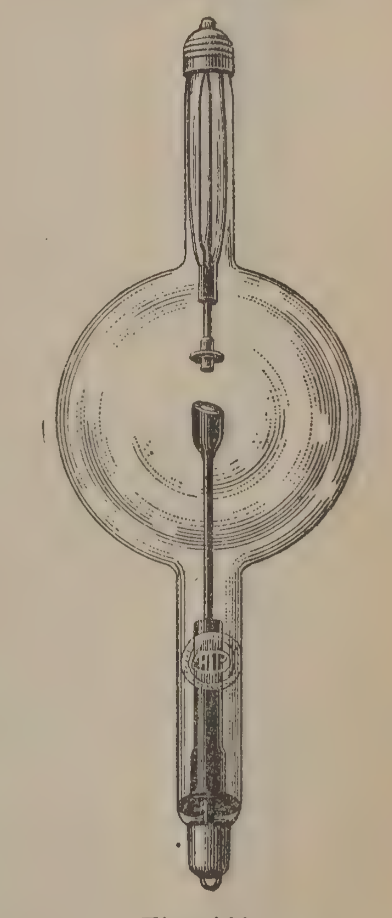


Fig. 109.

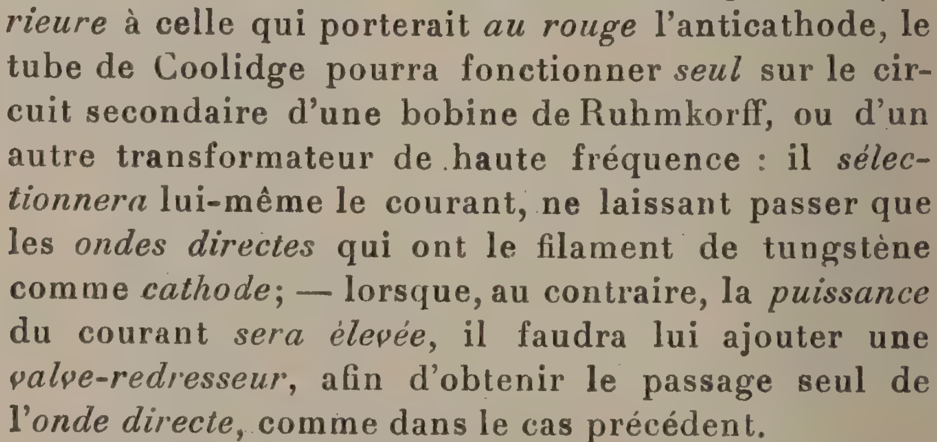
Le vide est tel qu'une tension électrique de 10^5 volts est incapable d'y faire passer un courant, si faible soit-il. On l'obtient à l'aide de pompes à huile, associées à des trompes à mercure; la pression du gaz restant (il est toujours impossible, on le conçoit, d'avoir le *vide parfait théorique*) est de l'ordre de 2 ou 3 centièmes de *micron* de mercure. Dans ces conditions, il ne peut se produire aucune ionisation des gaz

(1) Les rayons X sont engendrés par le choc des électrons sur l'anode (ou anti-cathode.)

très rares de ce tube, et l'émission cathodique existe seule, sans être troublée par un afflux quelconque d'ions. Il n'y a plus de *fluorescence* de l'ampoule. — Le ballon a 18 cm. de diamètre, pourvu de 2 longs cols soudés, afin d'éviter une étincelle possible entre les extrémités extérieures des électrodes ; la longueur totale des tubes est de 55 cm.

On remarquera que la *surface libre* de l'anode (anthicathode) est inclinée à 45° comme dans le tube de Crookes, sur l'axe de l'appareil, afin de dévier les rayons cathodiques (et les rayons X), et de faire sortir ces derniers dans le plan équatorial du tube.

N. B. — Le *régime à adopter* pour le fonctionnement d'un tube de Coolidge doit-être tel que l'*anticathode* (bombardée nécessairement par les rayons cathodiques) n'atteigne jamais une température telle qu'elle puisse émettre des électrons à son tour, ce qui tend à se produire avec des *tensions élevées*, et quand passe la *décharge inverse* (à ce moment l'anticathode-anode devient *cathode*) ; il faut donc éviter ce fait possible, en *adjoignant* à l'appareil une *valve-redresseur* de courant (*kénotron* ; voy. Chap. IV), qui ne laisse passer que l'*onde directe* du secondaire (le tube étant relié à ce secondaire en tenant compte de l'onde directe, repérée par un tube de Geissler).



En *résumé*, lorsque la puissance du courant de décharge sera *inférieure* à celle qui porterait *au rouge* l'anticathode, le tube de Coolidge pourra fonctionner *seul* sur le circuit secondaire d'une bobine de Ruhmkorff, ou d'un autre transformateur de haute fréquence : il *sélectionnera* lui-même le courant, ne laissant passer que les *ondes directes* qui ont le filament de tungstène comme *cathode* ; — lorsque, au contraire, la *puissance* du courant *sera élevée*, il faudra lui ajouter une *valve-redresseur*, afin d'obtenir le passage seul de l'*onde directe*, comme dans le cas précédent.

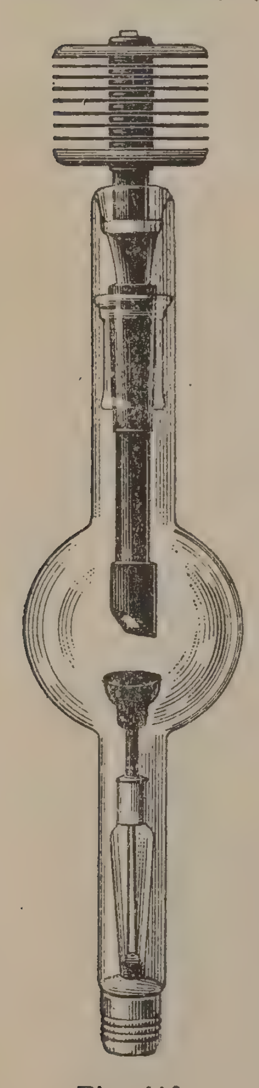


Fig. 110.

On remarque sur l'anticathode, une petite surface brillante (point d'*impact*) dont l'incandescence est due au choc du faisceau cathodique ; on donne à ce point d'impact, — dont le diamètre varie avec la distance entre les surfaces voisines des 2 élecrodes, — le nom de *foyer* du tube (1).

Il existe 2 types principaux de *tubes Coolidge* : le *type Standard* (celui de la fig. 109), à *foyer fin* (pour radiographie), ou à *foyer large* (radio-métallographie) ; il prend 20 milliampères sous 90.000 volts, et dépense 600 à 800 watts ; et le *type à radiateur* (fig. 110) pour la radiométallographie avec hautes tensions ; le radiateur à ailettes qui se trouve à l'extrémité extérieure de la tige de l'anticathode, refroidit celle-ci pour lui éviter d'être portée à une température qui lui permet-

(1) C'est lui qui émet les rayons X.

trait d'émettre des électrons; on peut donc l'employer sans valve-redresseur; l'anticathode est formée d'une masse de cuivre dans laquelle est enchassée une plaque de tungstène; l'ampoule a 8 cent. de diamètre; le tube 45 cent. de longueur.

Ce modèle à ailettes existe en 2 types : l'un fonctionne avec un courant de 3 milliampères, l'autre avec un courant de 10 milliampères, sous 55.000 à 60.000 volts, correspondant à 10 cm. d'étincelle à l'air; il consomme de 500 à 600 watts *au maximum*. Le type Standard est le plus puissant.

Le filament des tubes (cathode) est chauffé par un courant de 5 ampères sous 10 volts, avec une batterie d'accumulateurs, ou avec un petit transformateur spécial statique (la *nature* du courant importe peu, pour ce chauffage); la batterie d'accumulateurs (de 5 à 6 éléments) doit présenter une capacité de 40 à 75 ampères heure, le transformateur statique (quand on emploie le courant alternatif) doit fonctionner sous 10 volts aux bornes du secondaire alimentant le filament.

205. 3° Fonctionnement. — α) *Chauffage par courant continu.* — On relie la cathode C à la batterie de chauffage B (fig. 111), et à l'électrode négative du secondaire du transformateur, uniquement.

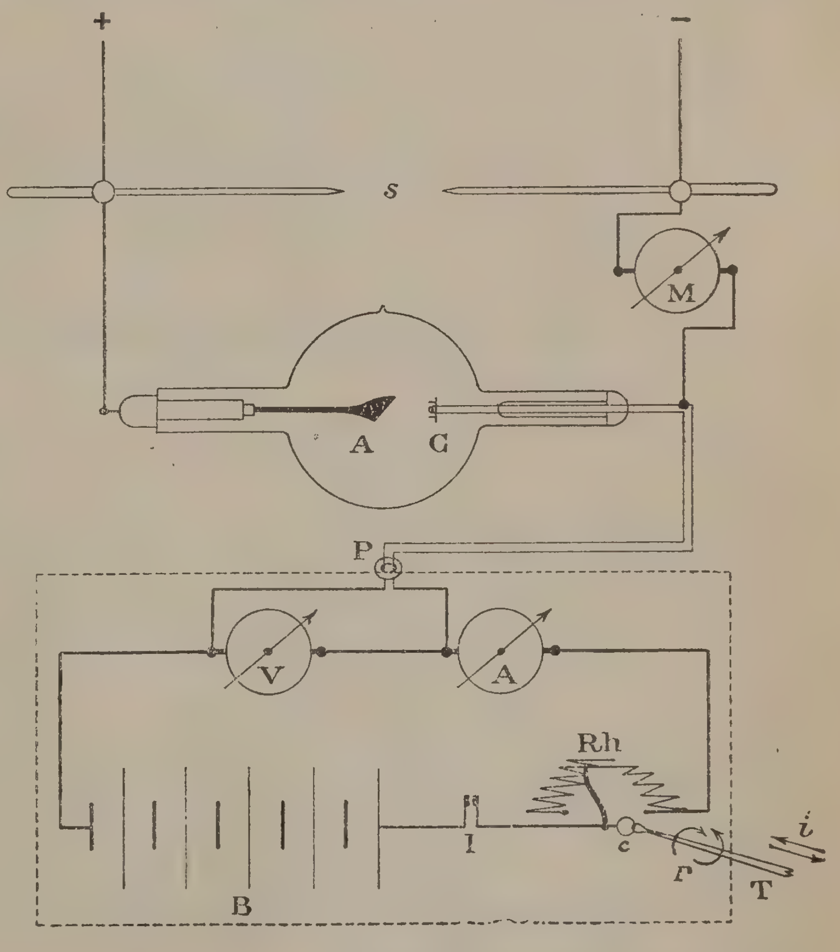


Fig. 111.

On chauffe d'abord le filament; et on ferme ensuite le circuit à haute tension quand la cathode a pris l'incandescence convenable : le tube fonctionne; on agit alors sur le rhéostat installé sur le primaire du circuit à haute tension, de façon à régler la différence de potentiels à la valeur qui convient pour la dureté voulue des rayons X émis : la longueur d'étincelles obtenue à l'air entre les pointes de l'excitateur *s* (*spintermètre*) fixe sur la valeur de la tension désirée. On agit ensuite sur le rhéostat (Rh) qui commande le courant de chauffage du filament, afin d'obtenir l'incan-

descence voulue (donc la température voulue), qui détermine, nous l'avons vu, l'intensité de l'émission électronique, donc du faisceau de rayons X ; l'appareil est ainsi réglé. Toutes les manœuvres en questions sont faites dans une cabine voisine et protégée.

Pour installer le corps à radiographier, on coupe le circuit du tube, — en laissant le filament chauffé ; — on met en place la plaque photographique (dans son châssis), et l'organe à examiner sur la table N (fig. 112) ; puis l'opérateur, — pour se protéger contre les rayons X,— se retire dans la cabine 1 de commande, séparée par lames de plomb P de 8 mm. d'épaisseur de la salle 2 du tube, et pourvue d'une *vitre anti-X* en verre au plomb : C ; — et de là, il remet le courant de haute tension sur le tube X qui, ayant été réglé antérieurement comme nous l'avons dit, fonctionne de nouveau.

De sa cabine, l'opérateur surveille le fonctionnement (fig. 112) ; la commande est sur le tableau T ; le transformateur à haute tension en

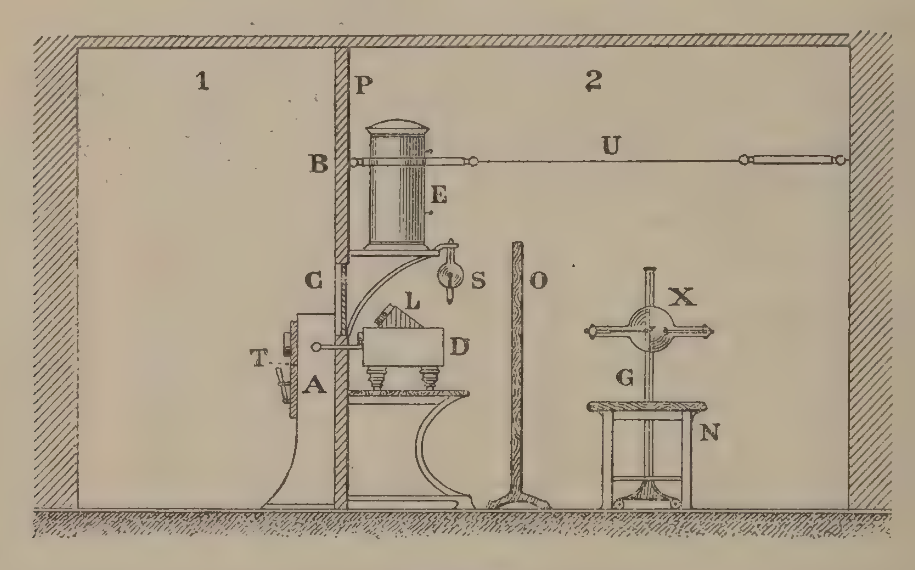


Fig. 112.

E ; S est la soupape-redresseur ; D est la batterie d'accumulateurs pour le chauffage du tube ; O un paravent protecteur recouvert d'une lame de plomb ; U sont des fils de trolley sur lesquels, à l'aide de contacts glissants, on établit les connexions entre les divers appareils.

β) *Chauffage par courant alternatif.* — La batterie d'accumulateurs est remplacée par un petit transformateur donnant 10^v aux bornes du secondaire relié au filament-cathode ; on règle le chauffage par un rhéostat installé sur le primaire, lequel est alimenté par le courant du *secteur* (qui est à la disposition de l'abonné). Il n'y a rien de changé au reste de l'installation, dont le réglage se fait comme nous l'avons dit au paragraphe (α).

206. 4° **Remarques sur le fonctionnement du tube.** — La *fluorescence* du tube de Crookes *n'existe pas* dans le tube de Coolidge, qui ne pré-

sente donc, comme particularité, qu'une *incandescence faible* de l'anticathode.

Dans le tube de Crookes, la fluorescence serait due au bombardement de *rayons cathodiques secondaires* émis par l'anticathode ; il faut admettre que la surface interne de la paroi de l'ampoule du tube Coolidge possède une *forte charge négative* qui *empêche* l'arrivée des rayons secondaires jusqu'à la paroi. Dans le tube de Crookes, cette charge négative, *moindre*, est constamment neutralisée par les ions positifs. Si l'on introduisait dans l'ampoule, une certaine quantité de molécules gazeuzes (à la pression du tube de Crookes), on verrait en effet réapparaître la fluorescence. Cette absence de fluorescence a pour corollaire un moindre échauffement du verre de l'ampoule, ce qui est un avantage.

Le tube de molybdène qui porte l'anticathode rougit généralement (au rouge sombre) ainsi que l'anticathode ; dans un tube où cette incandescence se produit (elle est dûe au fonctionnement à haute tension, surtout dans les tubes *sans ailettes* de refroidissement : type Standard), elle doit s'arrêter à 3 cm. au moins du verre de l'ampoule, dans le col d'anticathode. L'emploi d'une soupape-kénotron atténue d'ailleurs sensiblement cet échauffement (dû à l'*onde inverse*, quand le tube fonctionne *sans soupape*). Dans tous les cas, le point d'*impact* sur l'anticathode est toujours incandescent, mais il ne présente qu'une surface *très restreinte*, vis-à-vis de celle, très grande, de cette électrode.

Dans le faisceau de rayons X émis par un tube de Coolidge, on trouve en même temps qu'un spectre continu qui s'étend du coté des faibles longueurs d'onde, les raies du tungstène ; comme M. de Broglie l'a montré en recueillant, sur une plaque photographique, les radiations du tube diffractées par un cristal tournant.

Enfin l'expérience montre que les radiations du tube à *anthicathode de tungstène* sont plus *pénétrantes* que celles émises par une anticathode de platine ; les impressions photographiques sont plus nettes. — Mais comme ce tube est *plus puissant* que le tube de Crookes, il est aussi *plus dangereux* à manipuler : ce qui justifie les mesures de protection indiquées précédemment.

207. 5° **Radiométallographie.** — La grande pénétration des rayons du tube de Coolidge ont permis son emploi dans la radiométallographie, — où l'on peut faire traverser aux rayons X de ce tube des plaques de fer ou d'acier de 20 mm. d'épaisseur, à 1 m. 25 de l'anticathode ; le plomb (qui est un écran pour les rayons émis par un tube de Crookes, sous une épaisseur de 1 mm.) est traversé, jusqu'à l'épaisseur de 3 mm. par les rayons du tube Coolidge ; à 5 mm. d'épaisseur, uue feuille de plomb empêche totalement l'impression d'une plaque photographique qu'elle recouvre.

Les métaux sont traversés par les rayons X en raison inverse de leur *masse atomique* : le magnésium et l'aluminium, *très facilement*; le fer, le cuivre, *moins bien*; le tungstène le platine, *plus difficilement* encore; enfin le *plomb* est le moins pénétrable; les masses atomiques de ces métaux sont respectivement : 24, 27, 56, 63 $^1/_2$, 184, 195, 207.)

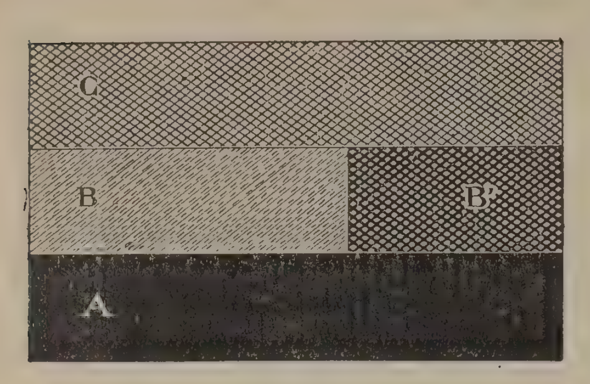


Fig. 113.

Il en résulte que, de 2 métaux ayant *même épaisseur*, et posés sur un même châssis photographique, soumis au même tube, celui qui a la plus faible masse atomique sera plus perméable : en face de lui, sur la plaque, on aura un négatif plus sombre; de 3 alliages B, C, B′ (acier au tungstène) à titre variable, celui qui renfermera le plus de tungstène (B′), et qui aura donc la *masse atomique moyenne* la plus élevée (moins perméable), donnera, sur épreuve positive, une tache plus sombre (fig. 113). Une feuille d'acier *mal soudée* fera apparaître, par des taches plus sombres, des surépaisseurs dues à une soudure défectueuse. L'examen d'une pièce quelconque obtenue par forgeage montrera si elle est homogène et bien façonnée (cliché uniforme) ou si elle renferme des *tapures* ou des *criquelures* (pièces forgée à une température trop basse); l'épreuve d'une pièce de *fonderie* montrera l'existence ou non de *soufflures*; la fig. 114 représente l'épreuve obtenue (positive) avec une section de pièce de canalisation en acier coulé, montrant des *soufflures* (près des flèches). On conçoit l'intérêt que présente la *méthode radiographique* pour l'ingénieur et le constructeur, en les renseignant sur la valeur des pièces fabriquées, en leur indiquant par un examen de quelques secondes, les défauts de fabrication d'un alliage; ou la différence de composition de 2 ou plusieurs alliages, par les *teintes différentes* obtenues par radiographie, et qui permettent de les classer par titres en métaux constituants : la *radiométallographie* devenant ainsi la collaboratrice de la *chimie analytique*. — L'appareillage employé est suffisamment indiqué par la figure schématique 112.

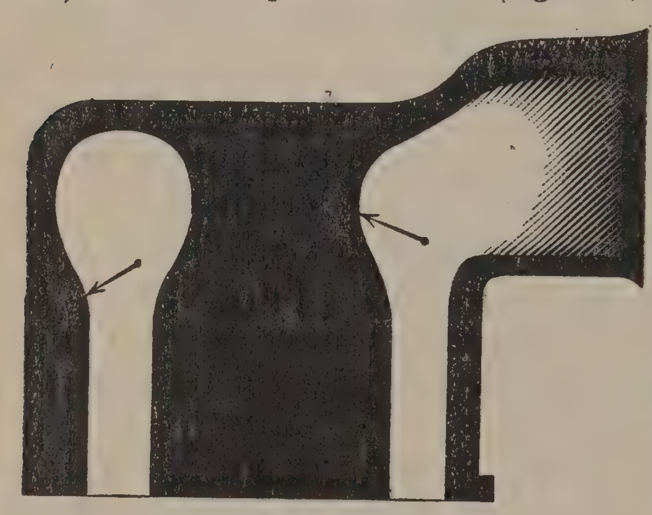


Fig. 114.

Les tubes Coolidge et l'appareillage qui les accompagne sont construits par la maison Gaiffe-Gallot et Pilon.

CHAPITRE IV.

VALVES ÉLECTRIQUES

208.— Nous désignerons, sous ce nom, les appareils qui permettent de *redresser* les courants alternatifs, ne laissant passer que des ondes de même sens par la nature même de leur fonctionnement propre. Les unes (*valves à mercure*, ou redresseurs à mercure) sont fondées sur le principe de la lampe à mercure, § 131 et 161; les autres sur l'émission électronique d'une cathode incandescente § 39, ce sont : le *kénotron* employé comme redresseur des courants alternatifs à haute tension; la *valve diode*; et les *valves triodes* employées en T. S. F.; les valves fondées sur l'émission électronique portant encore le nom de *valves thermoïoniques*.

1° Valves a Mercure

209. *a*) **Principe**. — Lorsqu'on examine l'*arc* à vapeur de mercure, obtenu dans une ampoule à *vide très élevé* $\left(\frac{1}{100}\right.$ mm. de mercure, — au lieu de 1 à 2 mm. dans les *lampes* servant *à l'éclairage*; § 161), on constate sur la surface du mercure (cathode *b*) une tache claire β, blanche et incandescente, avec, au-dessous, un cratère d'où s'élève une *flamme f'* assez longue (flamme négative), dirigeable avec un champ magnétique; et une *colonne lumineuse* positive *f* sortant de l'anode **a**, et se dirigeant vers la cathode : cette colonne constitue la *source de lumière* dans les lampes à vapeur de mercure.

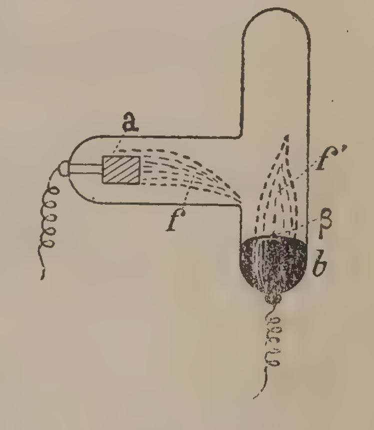


Fig. 115.

De la surface de la cathode à l'incandescence, se dégagent des électrons (négatifs), qui se dirigent vers l'anode avec une vitesse très grande; ces électrons choquent les molécules neutres et les *ionisent*, — ce qui accroît la conductibilité de l'espace inter-électrodes; de plus, les ions positifs formés *se précipitent* sur la cathode, la bombardent, et maintiennent, en l'accroissant, l'incandescence des points d'impact.

N. B. — L'existence de l'arc au mercure, — comme celui de l'arc entre charbons (§ 127) — n'est donc possible qu'avec une cathode incandescente ; et il en résulte que, dans une lampe à mercure, — quel que soit le vide obtenu, — le mercure doit toujours servir de cathode ; et l'arc ne pourra jaillir qu'entre une anode froide (en *fer* ou en *graphite* comme nous l'avons vu dans les lampes), et la cathode chaude, en mercure. Il sera *impossible* d'obtenir un arc, — donc, la conductibilité entre électrodes, — en disposant le mercure en anode, et le fer ou le graphite en cathode, même en leur appliquant *une différence de potentiels très élevée*. Il en résulte qu'une lampe comme celle de la figure 115, appliquée sur un réseau de courant alternatif, ne laissera passer, une fois amorcée, que la demi-onde de courant qui correspondra au fer ou au graphite-anode, et au mercure cathode ; la demi-onde inverse (mercure-anode) ne passera pas.

De plus, pendant la durée de cette demi-onde inverse, la *cathode se refroidit* et d'autant plus rapidement que la durée de la demi-onde sera plus grande, donc la fréquence du courant plus faible. Il est donc nécessaire de modifier cette lampe, en la munissant d'une *électrode supplémentaire* permettant l'amorçage et le maintien de la cathode chaude.

210. *b*) **Types de valves.** — 1° La valve de la fig. 116 est munie, outre l'anode en graphite *a*, et la cathode en mercure *b*, d'une anode supplémentaire *c* en *mercure*, reliée au pôle positif d'une batterie B d'allumage, dont le pôle négatif est relié en permanence à la cathode *b*. La même cathode *b*, et l'anode a sont connectées au circuit de courant alternatif *à redresser*, entre les bornes α et β.

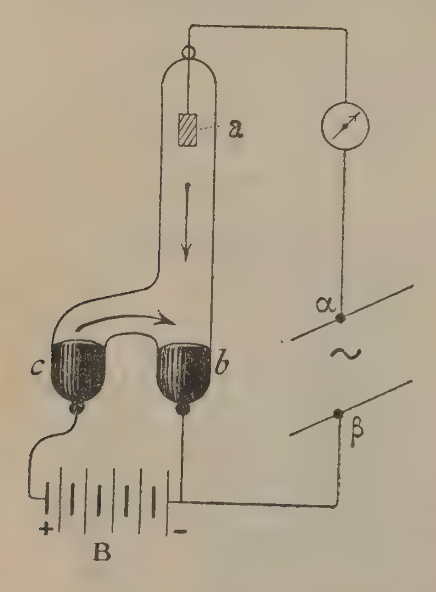


Fig. 116.

Pour amorcer la lampe, on fait *basculer* celle-ci, — les connexions étant établies comme nous venons de le dire, — le mercure des 2 ampoules *b*, *c* entre *momentanément* en *contact*, le courant s'établit dans le circuit B *c b* ; puis le contact est *rompu*, et un *arc* s'allume entre *c* et *b*, avec *c* comme anode et *b* comme cathode : à partir de ce moment, la lampe est *amorcée*, et la demi-onde directe du courant alternatif (entre α et β), passera de a en *b* (cette cathode demeurant chaude grâce au circuit B).

Mais une telle valve n'est *pas pratique*, car la forme du courant redressé serait celle de la fig. 117 représentant les demi-ondes directes γ, avec interruptions de courant en γ'.

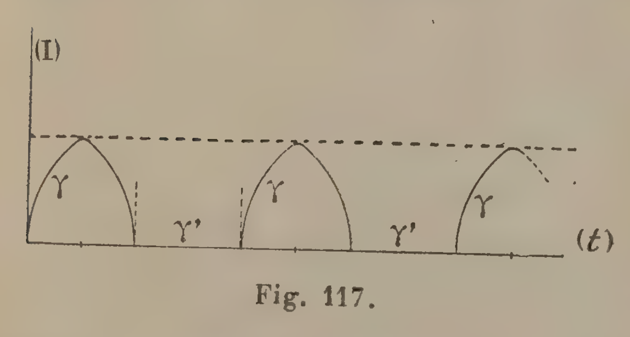


Fig. 117.

De plus, par suite du *choc des électrons* sur l'anode, celle-ci présente un point d'impact incandescent, de sorte qu'il se produit une légère vaporisation en ce point, et un *courant de retour*, mais *très faible* quand le vide est élevé (de l'ordre indiqué précédem-

ment) dans la valve ; ce courant très faible (quelques milliampères) ne porte d'ailleurs aucun préjudice au courant redressé.

2° Pour obtenir le redressement de 2 demi-ondes, on emploie une *valve à 2 anodes* en graphite : c'est le *type usuel*, admis universellement aujourd'hui.

La fig. 118 montre une telle valve, avec ses 2 anodes A, A′, sa cathode C en mercure, et l'anode d'allumage (en mercure) E, renfermées dans une ampoule en verre B, à vide de 10 microns. Un auto-transformateur diviseur de tension T, disposé sur le *circuit alternatif à redresser* (monophasé) — c'est-à-dire un transformateur dont le secondaire est à 2 enroulements distincts, — est relié, par son *milieu* I (point neutre), par l'intermédiaire d'une bobine d'inductance S, à la borne (—) du circuit destiné au courant redressé, ses extrémités α et α' (qui seront tour à tour positives, après chaque demi-alternance) sont reliées séparément aux deux anodes A et A′ ; l'anode E (supplémentaire) est reliée par une résistance de self r et un interrupteur K, à l'anode A (de gauche) ; la cathode C est reliée à la borne (+) du circuit d'utilisation du courant redressé. La moitié de l'enroulement du secondaire du transformateur présente une différence de potentiel dirigée du point neutre vers l'extrémité (α ou α') ; si le courant alternatif est à 50 p. sec. les 2 moitiés du *secondaire* seront donc parcourues par le courant, *tour à tour*, pendant $\frac{1}{100}$ de seconde (une demi-période) : les 2 *phases* du courant alternatif seront donc *redressées*.

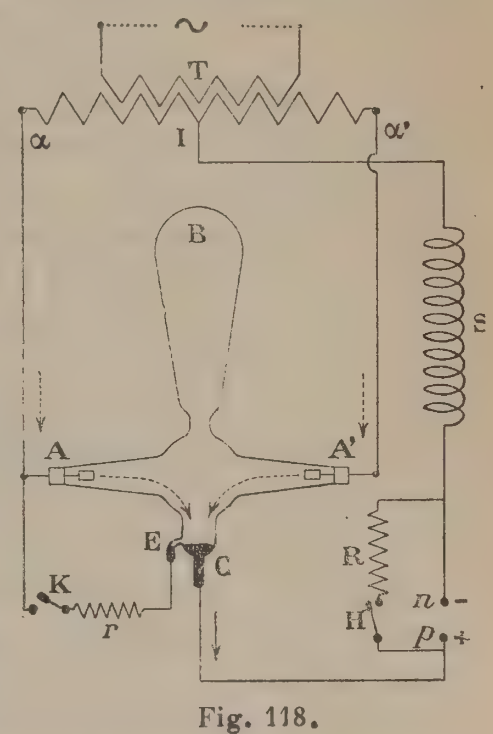


Fig. 118.

Pour mettre en marche la valve, on établit les connexions : $\begin{pmatrix} \alpha' A' \\ \alpha A \end{pmatrix}$, on ferme par l'interrupteur H, la résistance R sur le circuit (I-cathode C), et l'on ferme l'interrupteur K, puis on *bascule la valve* ; on aura contact du mercure de E avec celui de C, puis *rupture* : à ce moment une *étincelle de self* (grâce à r) jaillira entre E et C : le mercure se *vaporisera en* C, et l'amorçage sera effectué ; on coupe alors le circuit A r E (rendu maintenant inutile), et l'on ouvre H ; les deux phases de l'alternatif circuleront, tour à tour, de A en C, et de A′ en C, et l'on obtiendra un pôle (+)

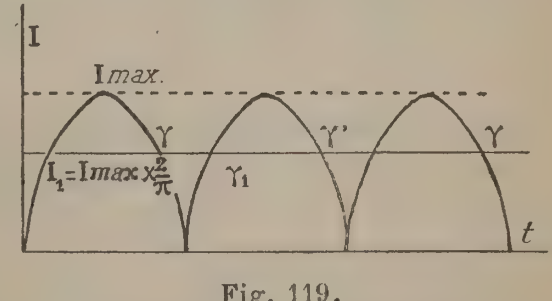


Fig. 119.

en p, et un pôle (—) en n, en permanence. La fig. 119 montre la forme du courant redressé : première demi-onde : γ ; deuxième demi-onde γ' (correspondant à l'intervalle vide γ' de la fig. 117) ; le courant redressé se rapprochera de la courbe γ_1, d'autant plus que la fréquence sera plus élevée ; on a, comme en sait : I_1 (int. moyenne) $= I$ max. $\times \frac{2}{\pi}$.

Entre p et n, l'on peut disposer une *batterie d'accumulateur* (à charger) ou un *moteur* à *courant continu* (à vitesse variable).

211. *c*) **Chutes de tension dans la valve.** — La chute de tension totale : E dans une valve, se compose : de la chute de tension à l'anode U_a, de la chute à la cathode : U_c, et de la tension nécessaire à l'entretien de l'arc : e. Ces chutes de tension, déterminées à l'*électromètre* (à l'aide de sondes en platine) sont les suivantes : $U_a =$ 6 volts 5 (anode en fer) ; $U_c =$ 5 volts 5 ; (celles-ci sont indépendantes de l'intensité du courant, et de la pression intérieure) ; pour e, elle dépend de la longueur l de l'arc, et de la pression H de la vapeur de mercure, ainsi que de l'intensité I du courant, et de la section S de l'arc lumineux ; elle est d'autant *plus faible*, par centimètre de longueur, que l'intensité I est plus grande, que la section S est plus grande, et que la pression H est plus faible.

Dans les lampes pour l'éclairage (voy. § 161 et suivants), où H = 1 à 2 mm. de mercure, et : I = 3 à 4^a, on obtient : $e' = 0^v,8$ à 1^v 2 par centimètre d'arc.

Dans les valves (H = 10 *microns* ; courant intense, de plusieurs dizaines d'ampères) on a : $e' = 0^v$ 1 au maximum, par centimètre d'arc ; pour un arc de longueur l cent., on aura : $e = e'\,l$ volts. Avec une valve ayant un arc de 60 cent., on trouvera ainsi :

(61) $E = U_a + U_c + e'\,l$: c'est une *tension minima*, pour allumer l'arc.

Pour : $l = 60$ cent. il vient : $e'\,l = 0{,}1 \times 60 = 6^v$; d'où : $E = 6,5 + 5,5 + 6 = 18$ volts ;

Mais en réalité, la tension E est *plus grande*, car elle doit vaincre en outre la *résistance initiale* du parcours de l'arc. Elle est *plus faible*, en tous cas, que pour les lampes à mercure (la pression est plus grande, dans le cas de la lampe). On compte, généralement, sur une valeur de 20 à 30 volts.

212. *d*) **Rendement** ; *facteur de puissance*. — Le rendement d'un redresseur varie avec la tension appliquée sur le courant à redresser, de 80 % (sous 50 volts), à 85 % (100 volts), 90 % (200 volts), 95 % (400 volts), 97 % (600 volts).

Le *facteur de puissance* dépend des harmoniques du courant à redresser ; il est toujours très élevé, de 0,85 à 0,90, selon les types et les puissances employés.

213. *e*) **Valve pour courants polyphasés.** — Elle est munie d'une *seule cathode*, mais renferme autant d'*anodes* qu'il y a de phases. Ainsi, pour une valve redressant des courants triphasés, on emploie le dispositif de la figure 120 : 3 anodes A, A′, A″ sont reliées respectivement aux extrémités α, α′, α″ des *enroulements secondaires* du transformateur installé sur la distribution à courants triphasés ; le point neutre I est relié à la borne (—) du circuit redressé ; la cathode à la borne + ; les 3 phases s'ajouteront donc dans le circuit (*p*, *n*), où l'on pourra installer les récepteurs : moteurs, ou batteries d'accumulateurs.

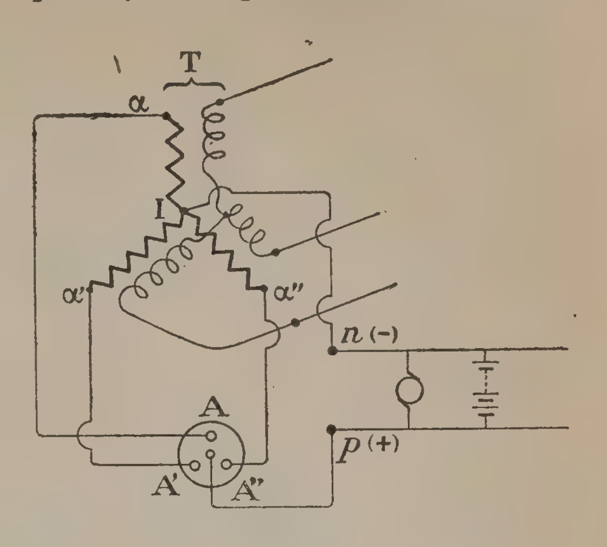


Fig. 120.

214. *f*) **Usages.** — On peut disposer les valves en *parallèle*, de façon à les faire débiter sur un circuit commun. On réalise ainsi des valves composées de 60ᵃ et 80ᵃ, formées de 2 valves séparées de 30 à 40ᵃ, alimentées par un seul transformateur.

On construit des valves (pour courants monophasés), de 150 à 1250 watts (3 à 5 ampères ; de 80 à 250ᵛ) ; de 300 à 2500 watts (4 à 10 ampères ; mêmes tensions) ; de 600 à 5000 watts (5 à 20ᵃ ; sous les mêmes tensions) ; de 5000 watts à 10 kilowatts (6 à 40ᵃ ; mêmes tensions) ; pour courants triphasés, on construit les mêmes valves, pour des tensions de 80 à 250ᵛ, et des débits de 4ᵃ à 40ᵃ (300 watts à 10 kilowatts).

La tension continue est réglée, avec les valves, par rhéostat sur le circuit continu, et aussi en modifiant le rapport de transformation du diviseur de tension : on obtient ainsi plusieurs tensions continues.

Applications : recharge des *accumulateurs* ; alimentation de *moteurs* à vitesse variable (machines d'imprimeries) ; alimentation d'arcs pour *cinématographie* (le fonctionnement direct de ces arcs sur alternatif étant toujours défectueux).

C'est la *Cie électro-mécanique* (Hewittic Electric C°) qui fabrique les valves à mercure, ainsi que les lampes du type Cooper-Hewitt, et du type Westinghouse (*silica*).

2° Kénotron.

215. — Le **kénotron** est une valve à vide, fondée sur l'émission électronique d'un filament de tungstène chauffé au rouge (voy. § 39).

Nous avons dit comment l'émission électronique obtenue dépend, à la fois, de la tension entre anode et cathode incandescente, et de la

température de celle-ci ; il est donc impossible d'utiliser un kénotron autrement qu'avec le filament-cathode, et une anode froide : les seuls courants qui circuleront dans cette valve, seront ceux qui iront de l'anode à la cathode ; et c'est ainsi qu'un appareil de ce genre, branché sur courants alternatifs, ne laissera passer que la phase correspondant à cette polarité des électrodes. — Le kénotron est une *valve diode*, c'est-à-dire à 2 électrodes.

Le kénotron étant utilisé pour redresser les *hautes tensions*, doit être construit de façon à éviter que l'attraction inévitable entre les électrodes les amène au contact, ou entraîne la *rupture* du filament, et qu'il se produise une étincelle entre les points d'amenée des électrodes.

Le kénotron doit toujours fonctionner dans la partie de la caractéristique (voy. fig. 19) qui obéit à la loi de Langmuir : $I = K E^{3/2}$ (émission à température constante) ; de plus, pour que la chute de tension entre les électrodes soit la plus faible possible, les 2 électrodes doivent être très rapprochées, mais avec consolidation du filament.

216. **Construction.** — Le *tungstène* fournit une bonne émission électronique (§ 39. α) ; le *molybdène* lui est supérieur (il émet 4 fois plus d'électrons à température égale), mais il est *plus fusible* que le tungstène, et ne peut donc être chauffé aussi loin ; il faut donc adopter le tungstène.

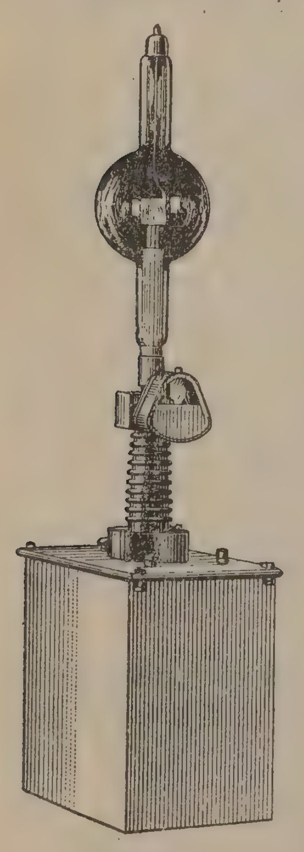
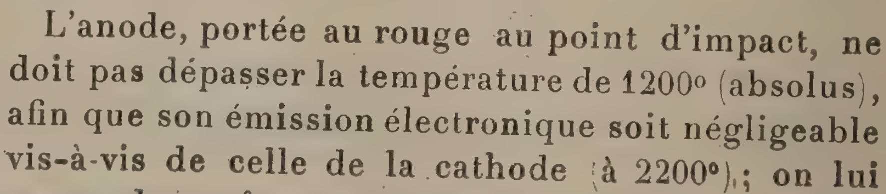


Fig. 121.

Les dimensions du filament sont déterminées en tenant compte de la chute de tension entre électrodes, et de la tension du courant à redresser ; son diamètre est toujours assez gros ; la température de chauffage ne doit pas être poussée trop loin, afin d'assurer une bonne durée au filament (qui s'électrovaporise) : 2200° (absolus) environ. La fig. 121 montre un kénotron tout monté (il ressemble, par la forme de l'ampoule, à un tube de Coolidge), avec une anode cylindrique, dans l'axe de laquelle se trouve le filament cathode, enroulé en spirale, et maintenu par un crochet porté par une *potence isolée*.



L'anode, portée au rouge au point d'impact, ne doit pas dépasser la température de 1200° (absolus), afin que son émission électronique soit négligeable vis-à-vis de celle de la cathode (à 2200°) ; on lui donne d'ailleurs une grande surface, afin qu'elle puisse se refroidir aisément (cas des faibles puissances) ; Laugmuir a donné la formule à employer, pour une anode qui doit être maintenue à une température absolue T :

(62) $$P = 12{,}54 \times \left(\frac{T}{1703}\right)^{4,74}$$; dans laquelle P est la puissance, en watts, nécessaire pour maintenir à T° (absolus) un *centimètre carré de* tungstène ou de molybdène ; on peut en déduire la surface à fournir à l'anode, en se donnant T à l'avance.

Pour la valve de la fig. 121, l'anode a une surface de 28 cm_2, et donne, pour T = 1200°, P = 2 watts. Pour les grandes puissances, (10 à 12 kilowatts) on emploie un refroidissement de l'anode par une circulation d'eau à l'extérieur de celle-ci (à doubles parois) ; l'anode est en nickel.

Le vide obtenu dans cette valve est du même ordre que celui de l'ampoule de Coolidge.

217. **Fonctionnement.** — Le filament est chauffé soit par une batterie d'accumulateurs, soit par un petit transformateur (comme pour l'ampoule de Coolidge).

1° On dispose pour utiliser une demi-onde seulement, le kénotron (fig. schématique 122) en *K* ; l'anode *a* est reliée à la borne (—) du *circuit redressé* ; le filament-cathode *c* est disposé sur le secondaire d'un petit transformateur *t* (pour le chauffage) ; il est relié d'autre part au secondaire du transformateur de haute tension T, dont le primaire est sur le réseau de courants alternatifs. Il faut isoler le transformateur de chauffage du filament ; — on connecte à la terre, le milieu I du secondaire du transformateur T (le secondaire du transformateur filament étant réuni à celui du transformateur haute tension, est ainsi isolé pour la moitié de la tension totale) ; le primaire du petit transformateur est en dérivation sur le circuit d'utilisation (courant alternatif), avec celui du transformateur haute tension.

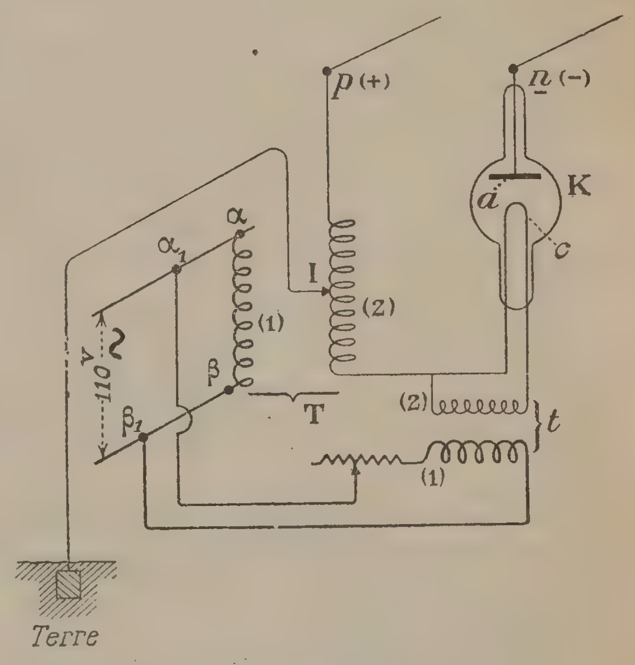


Fig. 122.

Sur le circuit *p n*, l'on dispose les *récepteurs* de courant continu (redressé) à haute tension (tubes Coolidge) ; il est facile de comprendre que l'on ne redresse ainsi qu'une *demi-onde* des courants alternatifs.

N.B.— Le kénotron n'est pas utilisable avec des tensions inférieures à 1000 volts.

2° Pour utiliser les 2 *demi-ondes*, il faut 2 *kénotrons* (fig. 123) ; le dispositif de la figure est le suivant ; le transformateur T (de haute ten-

sion) est construit pour donner au secondaire S_2 S_1 une *tension double* de celle du courant redressé ; le milieu I du secondaire est joint au pôle négatif β' du circuit à courant redressé (A est un ampèremètre) ; les 2 cathodes c, c' (en série l'une sur l'autre) sont réunies au pôle positif β du circuit redressé, par l'intermédiaire d'un rhéostat de réglage Rh ; les 2 filaments sont chauffés par le secondaire s d'un petit transformateur spécial t, dont le primaire p est branché sur le circuit alternatif (110v ; 50 p. sec. par exemple). L'une des moitiés du secondaire (S_1 ou S_2) travaille seule pendant une demi-période ; dans la première demi-période

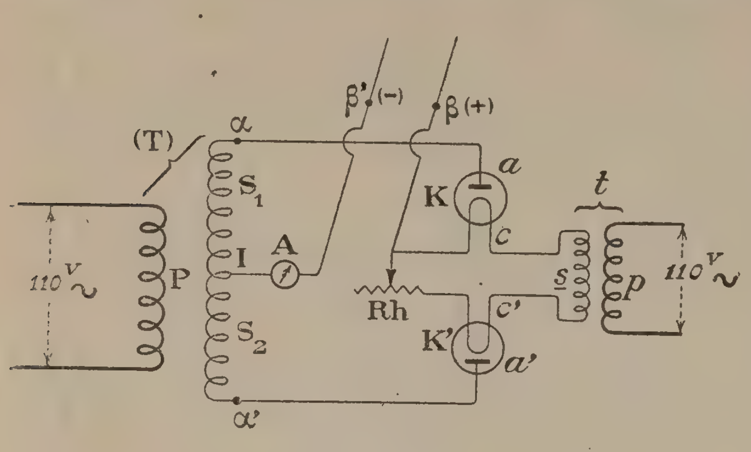


Fig. 123.

(α est +, p. ex.), le courant de la demi-onde correspondante passe dans le sens : (α a c β) ; dans la seconde demi-période, (α' est alors +), le courant passe dans le sens : (α' a' c' β) ; donc les cathodes travaillent constamment, et les anodes par alternance ; le circuit $\beta\beta'$ reçoit du *courant redressé* (selon la courbe γ_1 du graphique de la fig. 119).

3° On utilise le kénotron pour *charger* des *condensateurs* : le condensateur est relié ainsi : une armature à une borne (α') du secondaire du transformateur de haute tension, l'autre armature à l'anode ; le filament-cathode à la 2e borne (α) du secondaire du transformateur ; le condensateur est chargé par des courants redressés (*pulsatoires*) correspondant à une demi-onde seulement.

218. **Caractéristiques et Rendement.** — Un kénotron du type de la fig. 121 (fabriqué par les *Etablissements Gaiffe-Gallot et Pilon*) a fourni les constantes suivantes :

- Chute de tension (interne ; entre électrodes) : 500 volts.
- Consommation du filament : 4 amp. 3 sous 5 volts.
- Courant redressé : 0 amp. 1 ; sous 10^5 volts ; (ce kénotron sert à alimenter un tube Coolidge du *type Standard* ; voy. § 204).

Les pertes de cette valve sont : en *effet joule* (au filament), et en énergie cinétique par bombardement de l'anode par les électrons ; ces pertes ne sont pas élevées ; lorsque le refroidissement de l'anode est bien fait, on obtient un rendement de 95 à 98 %.

La *Cie des Lampes-Métal* fabrique aussi des *kénotrons*, avec courant de chauffage du filament allant de 1 à 6,5 ampères, sous 4,5 à 18 volts ; la *tension maxima* du courant à redresser étant de 600 volts (1er type),

et 20,000 volts (dernier type) ; *puissance* du courant redressé : 8 watts (1er type), et 500 watts (dernier type).

3° Valve diode (*tungar*).

219. **1° Constitution et Fonctionnement.** — *a*) Cette valve est basée sur le phénomène d'*émission électronique*,— comme le *kénotron*, comme les *lampes triodes* dont nous parlerons plus loin ; — elle se compose d'un filament de tungstène *c* que l'on portera à l'incandescence (cathode), et d'une plaque de graphite *a* (anode), à l'intérieur d'une ampoule V rappelant celle des lampes à incandescence, et renfermant de l'argon à la même pression que dans les lampes à gaz ; dans ces conditions, avec un *filament assez gros* on obtient une conductibilité plus grande qu'avec le vide, — par suite du phénomène d'ionisation du gaz ; — le filament est chauffé par le courant alternatif, comme dans le kénotron ; il est disposé en série avec une portion du secondaire (2) d'un transformateur T dont le primaire (1) est branché entre α et β sur le circuit alternatif du courant à redresser (fig. 124) ; quand on ferme le circuit du transformateur T, le filament s'échauffe ; et dès qu'il est incandescent, la demi-onde du courant alternatif correspondant à l'anode *a* (+) et à la cathode *c* (—) traverse l'atmosphère de la valve ; on obtient du courant redressé entre *p* (+) et *n* (—) ; une batterie d'accumulateurs B pourra être maintenue *en charge* avec cette valve, — qui n'utilise qu'une demi-onde de courant alternatif.

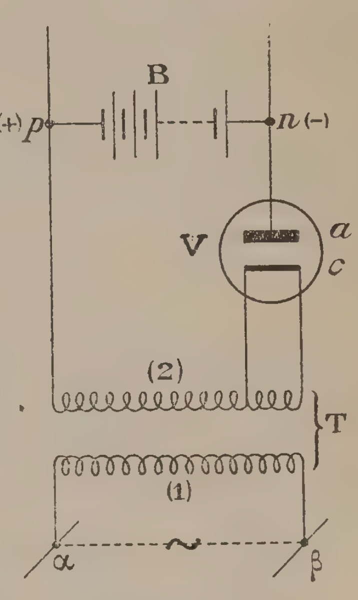
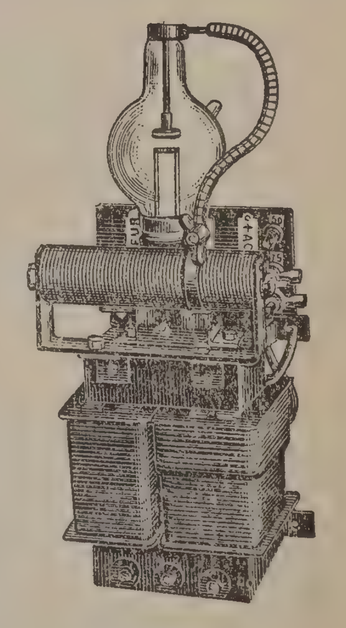


Fig. 124.

La fig. 125, montre une valve-tungar toute montée, avec son transformateur pour le chauffage du filament, et un rhéostat de réglage de la tension.

b) Si l'on veut utiliser les 2 demi-ondes du courant alternatif, on emploie 2 valves que l'on dispose absolument *comme les 2 kénotrons* de la fig. 123.

c) En imprégnant le tungstène du filament de quelques parcelles d'un métal léger (calcium ou magnésium), on obtient au début du fonctionnement un dépôt miroitant de ce métal sur la paroi interne de l'ampoule ; ce dépôt a la propriété d'absorber les impuretés du gaz (l'azote, en particulier).


Fig. 125.

220. **2° Avantages.** — Cette valve ne nécessite aucun dispositif de protection ; si le courant manque sur le secteur, le filament s'éteint et la bat-

terie B est en *circuit ouvert* : elle est donc protégée. Si le courant revient, le filament se rallume, et le fonctionnement se rétablit automatiquement.

Une ampoule-tungar dure 800 heures en *service normal*; à demi-charge, ou en service intermittent, — sa durée peut être *doublée.*

On peut coupler les « tungar » en parallèle, comme les valves à mercure, afin d'utiliser les 2 alternances.

3° **Puissance.** — On construit des valves-tungar pour des courants redressés de 2, 5, 10, 15 à 30 ampères (moyennes puissances), sous *60 volts*; on peut disposer 2 valves en série pour obtenir du courant redressé à 120 volts (une seule demi-onde est utilisée).

N.B. — Ces valves, d'un fonctionnement simple, sont destinées spécialement à la charge de batteries d'accumulateurs ; elles sont d'usage commode, et ne nécessitent aucune surveillance ni entretien.

4° Valves triodes (*pour la T.S.F.*)

221. **Définition.** — Nous avons étudié complètement, au § 39, l'émission électronique d'un filament de tungstène incandescent, en fonction de la différence de potentiels entre l'anode (*froide*) et la *cathode* incandescente, renfermées dans une *lampe à vide très élevé* (pression 10^{-6} millimètre de mercure) : c'était donc une lampe à 2 électrodes.

a) **Ancienne valve diode.** — Cette valve à 2 électrodes est dûe aux travaux de Flemïng.

1° Reprenons cette étude, en considérant une telle lampe L, avec sa plaque métallique P (*anode*), son filament F (*cathode*) chauffé par une petite batterie d'accumulateurs B'; une batterie plus puissante B étant reliée à la plaque et au filament, comme le montre la fig. 126 ; un milliampèremètre A indiquera le courant obtenu.

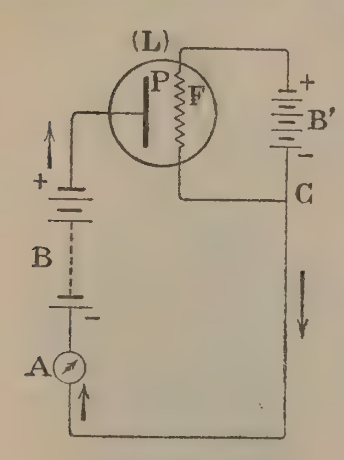


Fig. 126.

Dès que F est à l'incandescence, le milliampèremètre A indique un courant : donc, ce courant circule entre P et F dans le vide de la lampe. Nous savons que les électrons (négatifs) émis par le filament se précipitent avec une grande vitesse sur l'anode positive : l'espace est ainsi rendu conducteur, et *ferme* le circuit (PFCAP); le *sens* du *courant*, dans l'ampoule, est donc *inverse* du sens du mouvement des électrons : la plaque P est à un *potentiel* plus élevé que le filament.

L'émission électronique augmente avec : 1° l'incandescence du filament (en augmentant le nombre des accumulateurs en B' l'ampèremètre A indiquerait un courant plus intense); 2° avec le potentiel de P; on obtiendrait également un courant plus intense en augmentant le

nombre des éléments de la batterie B. Ceci est conforme à ce que nous avons vu au § 39.

Si l'on *inverse* la polarité de la plaque P (en la réunissant au pôle (—) de la batterie B), les électrons issus de F sont *repoussés* par la plaque P ; le courant cesse avec l'émission électronique qui se ralentit ; donc l'ampoule avec ses 2 électrodes est encore une *valve*, qui ne laissera passer, des courants alternatifs d'un circuit relié aux 2 électrodes, que celui correspondant à la demi-onde pour laquelle P est positive, et F négatif.

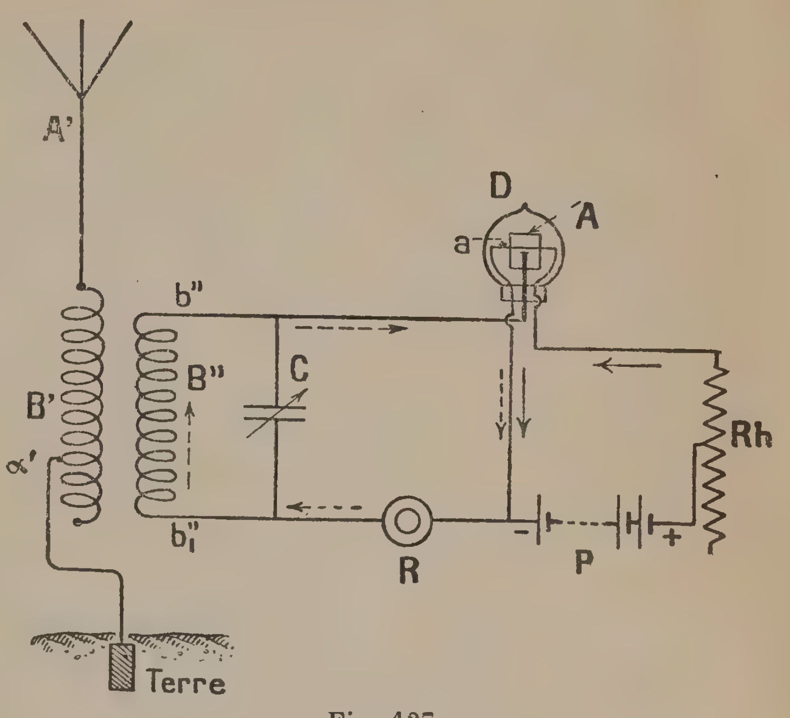


Fig. 127.

2° *Application de la valve-diode.* — Cette valve était employée en réception de T.S.F., comme l'indique la fig. 127. Le filament cathode *a* était chauffé par la batterie P (réglée par le rhéostat Rh) ; la plaque anode A était reliée à une borne b″ du secondaire de *haute fréquence* B″ ; l'autre borne b''_1, l'étant elle-même au filament *a* ; un récepteur téléphonique (R) était en série sur le circuit ; un condensateur réglable C, en dérivation. Le primaire B′ du transformateur était *accordé* à l'antenne de réception A′, et relié à la terre. Le seul courant qui circule dans le circuit plaque-filament, est le courant en pointillé, correspondant à *b″* (+), donc à A (+), et à *a* (—), et le téléphone fonctionnait grâce à ce courant redressé.

Le téléphone R est réglé pour *vibrer* avec la *fréquence* des courants redressés, correspondant à celle des ondes reçues par l'antenne A′, dans le primaire B′.

N. B. — Nous étudions, dans ce chapitre IV, les valves destinées à la T. S. F. au point de vue de la *valeur* du *courant électronique* qu'elles fournissent, et du *redressement* des courants qu'elle provoque ; nous ne voulons pas entrer dans l'étude complète des postes de T. S. F., le lecteur est prié de se reporter aux *traités spéciaux* à ce sujet.

222. *b*) **Valve triode.** — Les travaux de *de Forest* ont montré la nécessité d'une 3e électrode (appelée *grille*) pour un réglage plus sensible de la *valve thermoïonique.*

1° *Fonctionnement.* — La fig. 128 montre le schéma d'une telle valve L ; la plaque P est reliée, comme dans le dispositif précédent, à une batterie constante B, avec milliampèremètre A ; le filament F, chauffé par la petite

batterie B′ ; la grille G (cadre conducteur pourvu de fils parallèles tendus) est entre la plaque et la cathode-filament ; elle est reliée au pôle négatif d'une batterie d'accumulateurs B″ ; l'on voit que les 3 circuits : (B′F), (PBAF) et (GB″F) ont une borne commune : C (ou D, car il n'y a pas de chute de potentiels entre C et D). Le potentiel de la grille G (négatif) est inférieur à celui du filament ; la grille négative repousse les électrons émis par F et qui ne peuvent donc aller jusqu'en P : il n'y a *pas de courant électronique* entre P et F. Si nous diminuons le nombre d'éléments de la batterie B″, le potentiel de la grille, — toujours négatif, — croît, et une partie des électrons émis par F la *traversent*, et se rendent sur la plaque : l'ampèremètre A indique un *faible courant électronique* ; dans le circuit (G B″F), le courant est *nul* tant que le potentiel de G n'est pas devenu égal à celui de F, ce que l'on obtient en supprimant totalement la batterie B″, et en réunissant directement G à la borne C. Si l'on replace la batterie B″ mais *en sens inverse*, de façon que G soit à un *potentiel positif*, les électrons de F sont alors attirés par la grille, et dès qu'il y a un certain nombre d'éléments dans le circuit (GF), le courant électronique dans le circuit (PBAF) *croît* sensiblement : c'est qu'une partie seulement des électrons de F sont captés par la grille, le reste venant frapper la plaque P ; et l'on obtient (la grille étant alors une *anode* supplémentaire) un courant dans le circuit grille-filament, lequel croît avec le nombre d'éléments d'accumulateurs en B″ ; le courant de plaque continue à croître, mais il est *beaucoup plus intense* que celui de grille.

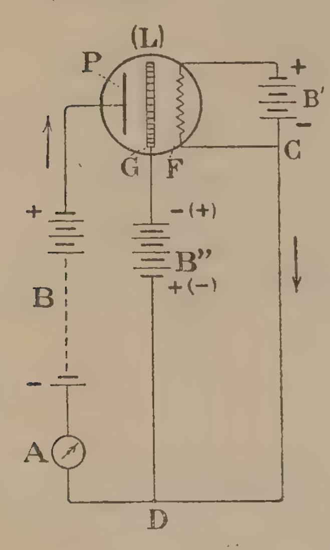


Fig. 128.

Si l'on continue à augmenter le potentiel de grille, — celui de la plaque *demeurant constant*, — le courant de plaque cesse de croître à un moment donné : les électrons sont captés également par les 2 anodes (grille et plaque) ; si l'on augmente le potentiel de grille au-delà de celui de la plaque, le courant de plaque après avoir passé par un maximum M (fig. 129), *commence à décroître* : la grille capte plus d'électrons que la plaque, le courant de grille continue à croître. La figure 129 montre les diagrammes comparés des courants de plaque et de grille, en fonction du potentiel de la grille.

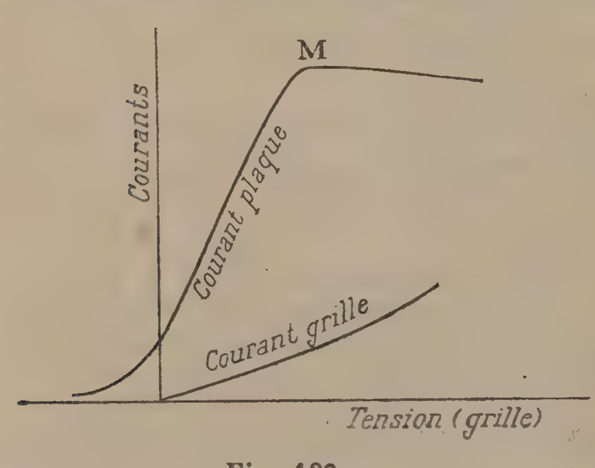


Fig. 129.

N. B. — On dit couramment *potentiel de plaque, potentiel de grille* ; ce qui signifie réellement : différence de potentiels (ou tension) entre la plaque et le filament, — ou entre la grille et le filament ; courant de plaque (ou de grille) signifie : courant allant de la plaque (ou de la grille) au filament.

Il résulte de tout ceci, — et les diagrammes le montrent aisément, — que le courant de plaque s'établit quand le potentiel de grille passe d'une valeur un peu inférieure à une valeur un peu supérieure à celui du filament.

Dans la *pratique courante* de l'emploi d'une valve, — en T.S.F. — le potentiel de grille, (reliée au secondaire du transformateur de haute fréquence), passe rapidement par des valeurs négatives, nulles (au changement de sens des courants), et positives ; on conçoit que, dans ces conditions, il y aura interruption et rétablissement successifs du courant de plaque, celui-ci étant toujours de même sens (on s'en rend compte en se reportant à la fig. 127, et en adjoignant, à la valve-diode de cette figure, une grille (entre A et a), qui soit connectée, en permanence, à la borne négative du circuit de chauffage du filament ; (voir § 230, pour la disposition du circuit dans le cas d'une telle valve).

2° *Caractéristiques.* — Les 2 courbes de la fig. 129, se nomment *caractéristiques* de plaque et de grille, en fonction du potentiel de la grille ; elles renseignent parfaitement sur le fonctionnement d'une valve-triode, en indiquant la forme et la grandeur relatives des courants obtenus ; bien que relevées en *fonctionnement statique* de la valve, elles permettent de voir comment celle-ci se comportera avec les courants de haute fréquence. — Mais le courant utilisé en T.S.F. (pour actionner le téléphone récepteur), est le *courant de plaque*, et il importe de connaître la loi des variations de ce courant, en fonction du potentiel de la plaque par rapport au filament, afin de se rapprocher des conditions de l'étude du § 39 ; avec cette restriction que, dans la lampe triode, le potentiel de grille influe sur les résultats.

223. 3° **Essai d'une valve thermoionique.** — Nous avons essayé récemment quelques valves thermoioniques, pour lesquelles nous avons déterminé les *caractéristiques spécifiques*, et les *caractéristiques* de *fonctionnement statique* de *plaque* et *de grille*. Voici les résultats obtenus pour l'une d'elles. *Valve S.I.F.* (*construite par la société Philipps.*) — α) La résistance à chaud du filament (fonctionnant sous 4 volts) est le quotient de cette différence de potentiels par l'intensité du courant normal de chauffage : i_n (évalué en ampères à l'aide d'un ampèremètre Meylan-D'Arsonval, donnant les lectures à $2^{m.a}5$) par la formule : $R_n = \frac{4^v}{i_n}$; la résistance à froid a été obtenue au pont de Weahtstone, et était ramenée à 0° centigrade ; la puissance du courant de chauffage valait : $P_n = 4\,i_n$; la température τ (déduite de l'état du filament) est de 2200°. La valeur du rapport $\frac{R_n}{R_0}$ caractérise bien une lampe au tungs-

tène dans le vide, pour une intensité lumineuse voisine de 1 b. d. 5. Voici les résultats obtenus :

i_n (amp)	R_n ohs	R_0 ohs	$\frac{R_n}{R_0}$	P_n (watts)	τ (degrés centigrades
0,7025	5,694	0,506	11,25	2,81	2200°

β) La *caractéristique de plaque* a été obtenue en disposant la valve comme dans la figure 128 ; la batterie B donnait à volonté de 0 à 80 volts ; la batterie B′ était constante, à 4 volts ; la batterie B″ de 7 éléments Leclanché (de 1v50 chacun) permettait de faire varier le potentiel de grille, en *signe*, et en *valeur absolue*.

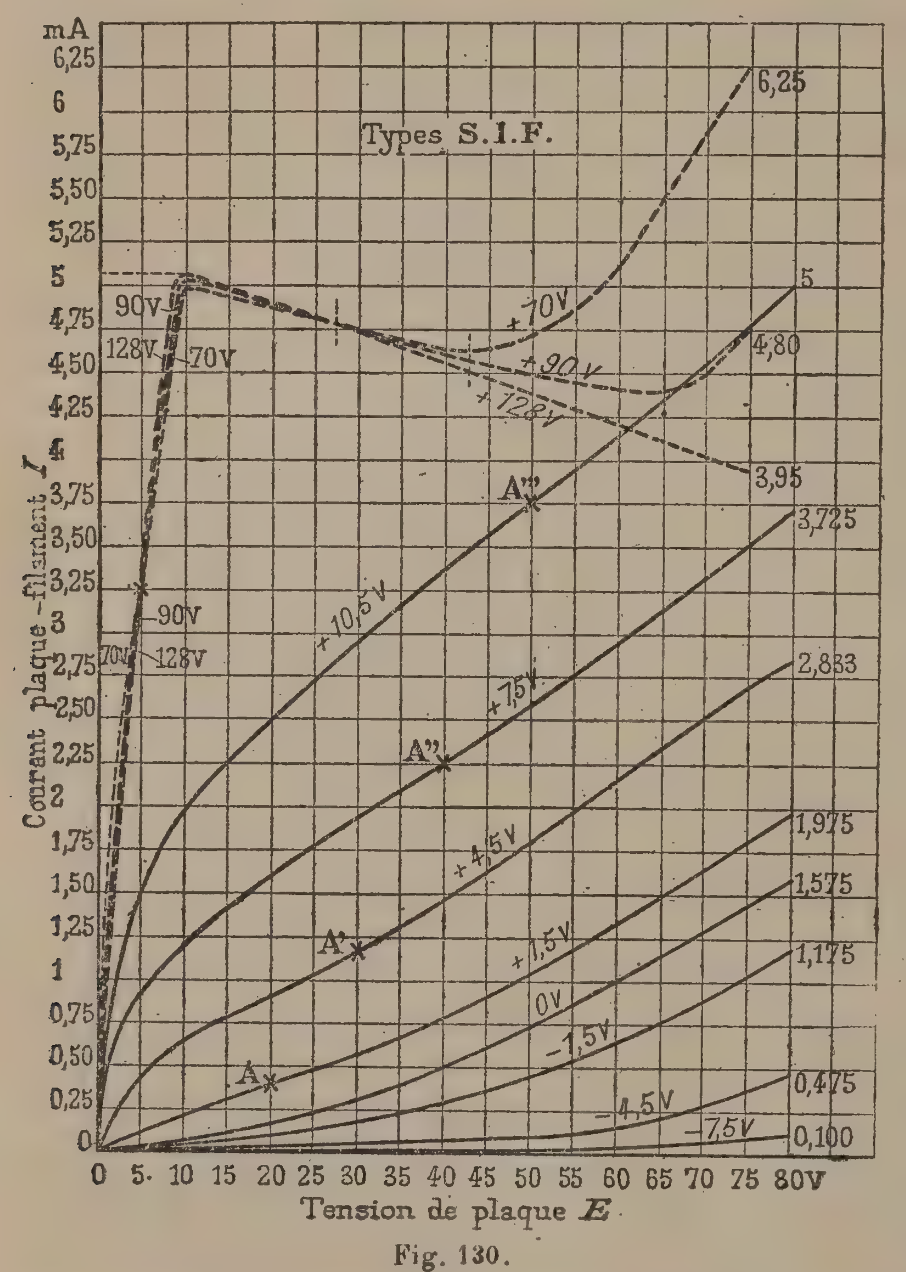


Fig. 130.

Un milliampèremètre Chauvin et Arnoux nous donnait l'intensité du courant plaque-filament, et du courant grille-filament à 0,025 milliampère près. Deux voltmètres Meylan-D'Arsonval (donnant les lectures à 0 volt 25) permettaient d'évaluer les différences de potentiel : plaque-filament, grille-filament.

En maintenant fixe le potentiel E′ de grille (négatif ou positif), nous faisions varier la tension E de plaque, de 0 à 80 volts, et nous lisions sur le milliampèremètre l'intensité I du courant électronique plaque-filament ; nous pouvions ainsi tracer une caractéristique de plaque pour la tension de grille en question.

En recommençant les essais avec un autre potentiel de grille, nous obtenions une autre caractéristique. La fig. 130 montre en traits pleins les caractéristiques de plaque obtenues avec des potentiels de grille s'échelonnant de — 7,5 volts à + 10,5 volts. Le courant électronique, faible au début (ceci résulte de ce qui a été dit au § 222) avec un potentiel E′ négatif, croît sensiblement avec un potentiel positif. Les courbes *changent de forme* à partir d'un potentiel de grille positif ; elles présentent alors un *point d'inflexion* (A A′ A″ ou A‴) d'autant plus élevé, que la tension de grille est plus élevée; les caractéristiques sont sensiblement parallèles à partir des points d'inflexion.

N. B. — On voit que l'intensité du courant plaque-filament obtenue sous la plus haute tension de grille essayée (10,5 volts), et la plus grande tension de plaque (80 volts), est égale seulement à 5 *milliampères*.

Le coefficient angulaire, après le point d'inflexion, caractérise bien l'émission électronique du filament.

224. γ) L'influence d'un *haut potentiel* de grille sur le courant du circuit plaque-filament, est caractérisée par les graphiques en *traits pointillés* de la fig. 130. Pour obtenir ces courbes, nous avons recommencé nos essais en reliant la grille, par un rhéostat à curseur, au pôle + d'une distribution de courant continu (sous 130 volts), et le filament au pôle négatif ; nous avons évalué le courant I de plaque sous les tensions E′ de grille : + 70^v ; + 90^v ; et + 128^v, en faisant varier, pour chaque tension de grille, la tension E de plaque de 0 à 80 volts. Ces graphiques montrent que le courant électronique croît brusquement jusqu'à une valeur maxima correspondant à E = 10 volts; puis décroît, passe par un minimum qui se produit d'autant plus tard que la tension (E′) de grille est *plus élevée* ; les courbes se relèvent ensuite, et tendent à s'infléchir.

N. B. — Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par *Von Goest* avec une *valve Coolidge* (montée en *dynatron*; voy. ci-après) ; ils s'expliquent ainsi : les électrons dont l'émission est *accélérée* par la tension élevée de la grille, frappent violemment la plaque (anode) et donnent lieu à une *émission secondaire d'électrons* qui traversent la grille lorsque sa tension dépasse celle de la plaque ; quand la tension de la plaque se rapproche de celle de la grille, l'émission secondaire se ralentit, et le courant électronique croît de nouveau, et d'autant *plus vite* que la tension de grille a une valeur plus rapprochée de celle de plaque ; ceci explique *le retard* au relèvement de la courbe de I, sur les caractéristiques correspondant à une tension de grille de 90^v d'abord, de 128^v ensuite — dont le redressement se fait ultérieurement.

225. δ) Nous avons relevé les *caractéristiques de grille* de la même valve (SIF) en maintenant d'abord la tension de plaque constante et égale à 40 volts, et en faisant varier la tension E′ de la grille de 0 à 10^v 5; puis en maintenant la tension de la plaque à 80^v, et en recommençant à faire varier celle de grille de 0^v à 10^v 5. Les intensités du courant grille-filament étaient relevées au milliampèremètre disposé

sur le circuit en question. Le tableau suivant donne les résultats obtenus pour les courants : plaque (I), et grille (I′), en fonction de E′.

Tension E′ (grille)	Tension plaque : 40v		Tension plaque : 80v	
	I (*m.a.*)	I′ (*m.a.*)	I (*m.a.*)	I′ (*m.a.*)
0 volt	0,500	0	1,575	0
,5	0,766	0,025	1,975	0,033
4,5	1,475	0,133	2,833	0,166
7,5	2,266	0,275	3,750	0,325
10,5	3,400	0,450	4,950	0,475

La fig. 134 montre en C la caractéristique du courant-plaque, et en *c* la caractéristique du courant-grille en fonction de E′, et pour la tension E = 80v de plaque seulement.

L'examen du tableau montre que le courant-grille, qui vaut 7,55 fois moins que le courant-plaque, pour E′ = 10v5 et E = 40v ; vaut 10,42 fois moins pour E′ = 10v5 toujours, mais pour E = 80v.

Remarque. — Ces résultats vérifient ce qui a été dit précédemment sur le rôle de la grille ; et montrent que (*loi de Langmuir*), le courant électronique croît avec la tension E de plaque, toutes choses égales, — et ceci à la *même température* du filament (celle qui correspond à 4v à ses bornes) ; mais la *forme* des *courbes* du courant de plaque, en fonction de la tension de plaque (fig. 130), est *différente* de celle de la fig. 19 : à cause de la présence de la grille, et du rôle que joue cet organe sur l'émission électronique. On vérifierait, également, que pour un même potentiel de plaque, le courant est plus intense quand on chauffe davantage le filament.

N. B. — En continuant à élever la tension de plaque, il arriverait que, pour une tension de grille suffisante, la caractéristique de plaque se rapprocherait de l'axe des tensions, auquel elle tend à devenir parallèle : on aurait alors un *courant de saturation* (rev. § 39). Dans l'emploi des triodes, l'on se tient toujours *au-dessous* de la *tension critique* qui donnerait la saturation, et que le constructeur indique ; elle varie selon la puissance de la lampe, entre 80v (types moyens), et 200v (puissances plus grandes).

N. B. Nous indiquerons, un peu plus loin, les résultats de nos essais sur 2 autres valves triodes destinées à la T. S. F. (Voy. § 229.)

226. *c*) Description de types de valves. — La fig. 131 montre la valve triode *type T. M.* (*Cie des lampes-Métal*) ; le filament *a b*, en tungstène, de 5 à 6 centièmes de millimètre de diamètre, a ses extrémités reliées, par 2 cordons en nickel qui le tendent solidement, à 2 broches A et B, fixées au culot de la valve (dont l'*ensemble* rappelle absolument une *lampe à incandescence*) ; il est tendu dans l'axe de la plaque-anode C, en nickel ayant la forme d'un cylindre (longueur : 1 cm. 5 ; diamètre :

9 mm.) ; cette anode est soudée à un cordon de même métal qui la relie à la broche C′ du culot ; la grille *g* a la forme d'une hélice en molybdène, de faible diamètre (4 mm.), à spires assez serrées, placée entre la plaque et le filament, plus près de ce dernier, et reliée par un cordon à une 4e broche D′.

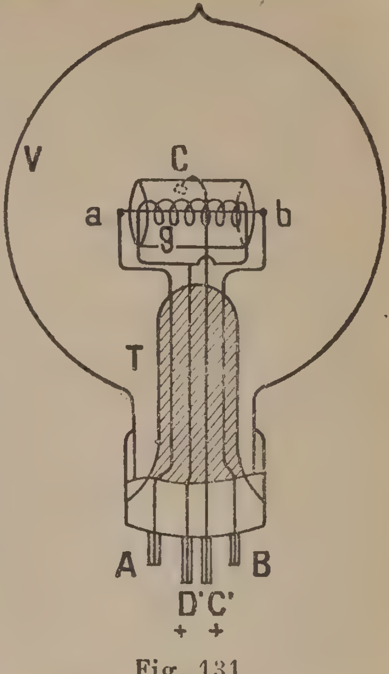


Fig. 131.

Un tube de verre (*pied*) T emprisonne les cordons de support des 3 électrodes, et est soudé à l'ampoule. Le vide dans cette ampoule est *inférieur à 1 micron.*

A l'aide du culot à broches, la valve est fixée sur une douille possédant 4 petits tubes de laiton ou de cuivre, dans lesquels ces broches pénètrent à frottement ; les tubes de la douille sont reliées aux divers circuits qui doivent comprendre le filament, la grille, et la plaque.

Avec le vide de 1 micron, le courant électronique est *plus intense* avec de faibles tensions de la plaque (15 à 20 volts) ; avec $\frac{1}{10}$ de micron, il faut au moins 80 volts de tension plaque-filament, pour obtenir un bon courant électronique.

Les *autres types* de valves ressemblent plus ou moins à celle que nous venons de décrire. La fig. (*131 bis*) montre l'aspect photographique de la valve T. M.

La lampe S. I. F. ressemble beaucoup à la précédente, comme disposition générale ; tous les cordons qui relient les 3 électrodes aux broches, sont dans le *même plan* vertical (celui du filament) ce qui assure beaucoup de solidité à l'appareil.

La *Société Grammont, à Lyon*, construit une lampe triode du même type (*valve Fotos*) : c'est là qu'est née d'ailleurs, en 1915, la lampe triode sous la forme générale que lui donnent les constructeurs actuellement.

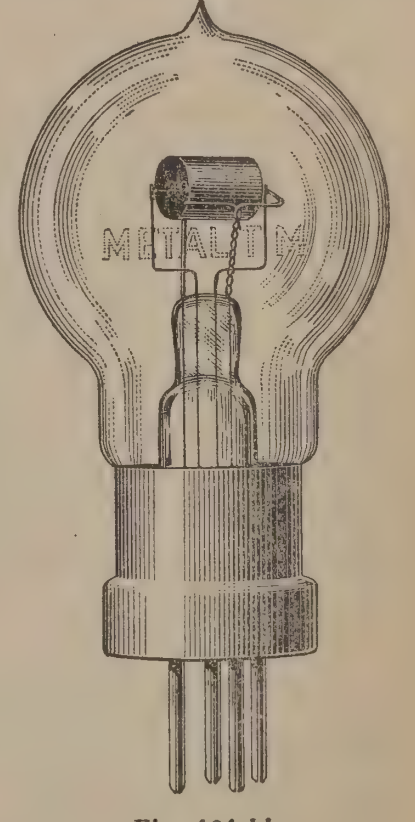


Fig. 131 *bis*.

227. *d*) **Construction d'une valve.** — L'ampoule est la même que celle d'une lampe à incandescence ordinaire, pourvue d'un queusot ; le pied se prépare également de la même façon. Le *montage* seul du pied est différent.

Les électrodes sont en *nickel* à l'intérieur de l'ampoule, en *platinite* à travers le pied T auquel elles sont soudées par fusion du verre, et en

cuivre, du pied à la broche; ces 3 parties sont soudées à l'avance bout à bout, par fusion au chalumeau, des extrémités voisines au contact.

La plaque (anode) est découpée dans une bande de nickel (quelquefois de *molybdène* pour les lampes d'émission : Voy. § 234), et roulée en cylindre (dont nous avons donné les dimensions), puis soudée par un point de sa paroi extérieure à l'extrémité supérieure du cordon-nickel de son électrode; le fil de molybdène de la grille est enroulé en hélice dans la gorge d'une vis, puis soudé à ses extrémités au cordon nickel, se terminant en fourche à la partie supérieure, à cet effet. Le filament est logé, par ses extrémités, dans les 2 crochets qui terminent en *a*, et *b* (fig. 131), les 2 bouts d'électrodes en nickel. Le pied étant alors *monté*, est introduit dans l'ampoule, comme pour une lampe à incandescence; on chauffe, au chalumeau, la base du pied et le col de l'ampoule, pour les souder ensemble; l'ampoule est *fermée par le bas*, les cordons-cuivre des électrodes sortant du tube T du pied.

L'ampoule est alors reliée, par le queusot, à une pompe moléculaire à huile ou à une pompe à condensation de vapeur de mercure, qui peuvent pousser le vide jusqu'au $\frac{1}{100}$ de *micron* de mercure ; la canalisation qui joint le queusot à la pompe est refroidie, dans le cas d'une pompe à mercure, par de la neige carbonique dissoute dans l'acétone, afin de condenser la vapeur de mercure (dont la tension de vapeur atteint le *micron* dans le vide en question, et à la température ambiante) ; l'ampoule est *chauffée* pendant le pompage (comme pour les lampes à incandescence) ; on lance dans le filament des courants gradués pour l'amener à l'incandescence ; puis on porte la grille et la plaque à une forte tension positive par rapport au filament ; le bombardement de la grille et de la plaque les échauffe alors jusqu'à l'incandescence : les gaz occlus se dégagent, et envahissent l'ampoule ; en même temps que les électrons les ionisent, et une lueur bleu-violacée apparaît, d'autant plus intense que le vide est moins parfait; quand la lueur a disparu, on fond la partie rétrécie du queusot au chalumeau, et la lampe est fermée complètement. Il ne reste plus qu'à adapter le culot, muni de ses broches, que l'on ferme comme nous l'avons dit pour les lampes d'éclairage. Une fois terminée, la valve est soumise à l'*essai* que nous avons décrit aux § 223 à 225. — Les lampes décrites précédemment servent pour la *réception* en T.S.F.

228. *e*) **Valves à $\frac{6}{100}$ d'ampère à filament de** *tungstène-thorium*. — La *Cie des lampes-métal* construit un type de lampe à consommation très réduite, pour la *réception* et l'*amplification* en T.S.F.

Elle se compose (fig. 132, qui montre son aspect extérieur) d'une ampoule cylindrique, dans laquelle sont logées les 3 électrodes, — *disposées* comme dans les autres types de lampes ; — seulement le filament,

au lieu d'être en *tungstène pur*, est en *tungstène* renfermant du *thorium*.

α) *Langmuir* a montré, en 1923, qu'en incorporant au tungstène, 1 à 2 % de thorium, on obtient une émission électronique *plusieurs milliers* de fois plus grande qu'avec le tunsgtène pur ; — on imprègne le filament de tungstène d'oxyde de thorium, on chauffe entre 2.600° et 2.800° centigrades pendant quelques secondes pour réduire l'oxyde ; on chauffe ensuite entre 2.000 et 2.100°, pour *diffuser* quelques atomes de thorium à la surface du filament (le thorium a une masse atomique élevée : 232,4) ; en chauffant ensuite le filament ainsi préparé, à une température comprise entre 1.400° et 1.500°, on obtient une activité très grande, supérieure à celle du tungstène, et qui demeure *constante* quand la température demeure au-dessous de 1.900° ; elle croît comme le logarithme de σ (fraction de surface couverte).

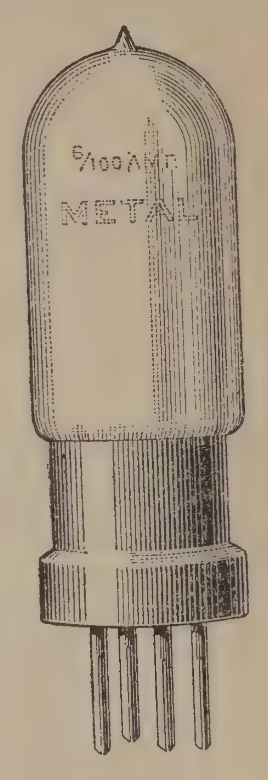


Fig. 132.

L'évaporation normale du thorium d'une surface de filament de tungstène partiellement recouverte de ce métal ($\sigma = 0,2$ à $0,8$) est donnée par centimètre carré et par seconde, par le nombre d'atomes ε exprimé par la formule suivante, à la *température absolue* T) :

(63) $$\log \varepsilon = 31,43 - \frac{44.500}{T}$$; (d'après *Langmuir*).

Comme la valve en question ne peut être chauffée à une température très élevée lors de son pompage (puisque l'on ne dépasse pas 1400°), il est difficile d'évacuer complètement les gaz occlus avant la fermeture. On obvie à cet inconvénient, en déposant sur le filament, à la formation, quelques parcelles d'un métal léger (calcium ou magnésium) ; ce métal se volatilisant dans l'ampoule, vient former un *dépôt miroitant* qui masque presque complètement le dispositif intérieur ; ce dépôt a pour effet de *fixer* les gaz demeurés dans l'ampoule à la fermeture, et de maintenir ainsi un vide convenable pendant le fonctionnement ultérieur.

β) L'*essai* d'un *type de ces valves* nous a donné les *résultats suivants* (en procédant comme nous l'avons indiqué pour la valve S.I.F., au § 223, et avec les *mêmes notations*) :

i_n (ampères)	R_n ohs	R_o ohs	$\frac{R_n}{R_o}$	P_n watts	τ (température centigrade)
0,060	66,666	6,638	10,04	0,24	1.200°

Le quotient $\frac{R_n}{R_o}$ indique bien que l'on n'a pas affaire à du tungstène pur ; le filament est seulement porté (avec une différence de potentiels constante de 4 volts), à la température du rouge-cerise ; et nous venons de voir que, dans ces conditions, son émission électronique est très intense, pour un faible courant de chauffage du filament, 10 à 12 fois plus faible que celui d'une valve S.I.F. ou T.M. ; la puissance absorbée est également *10 à 12 fois* plus faible : c'est une valve très économique.

N.B. — On donne encore à ces valves de faible consommation, le nom de *microtriodes*.

229. *f*) **Comparaison de quelques types de valves.** — La valve précédente (que nous désignons sous la rubrique (X), a été essayée en même temps qu'une valve T.M. et la valve S.I.F. déjà décrite, et en opérant *toujours de la même façon.*

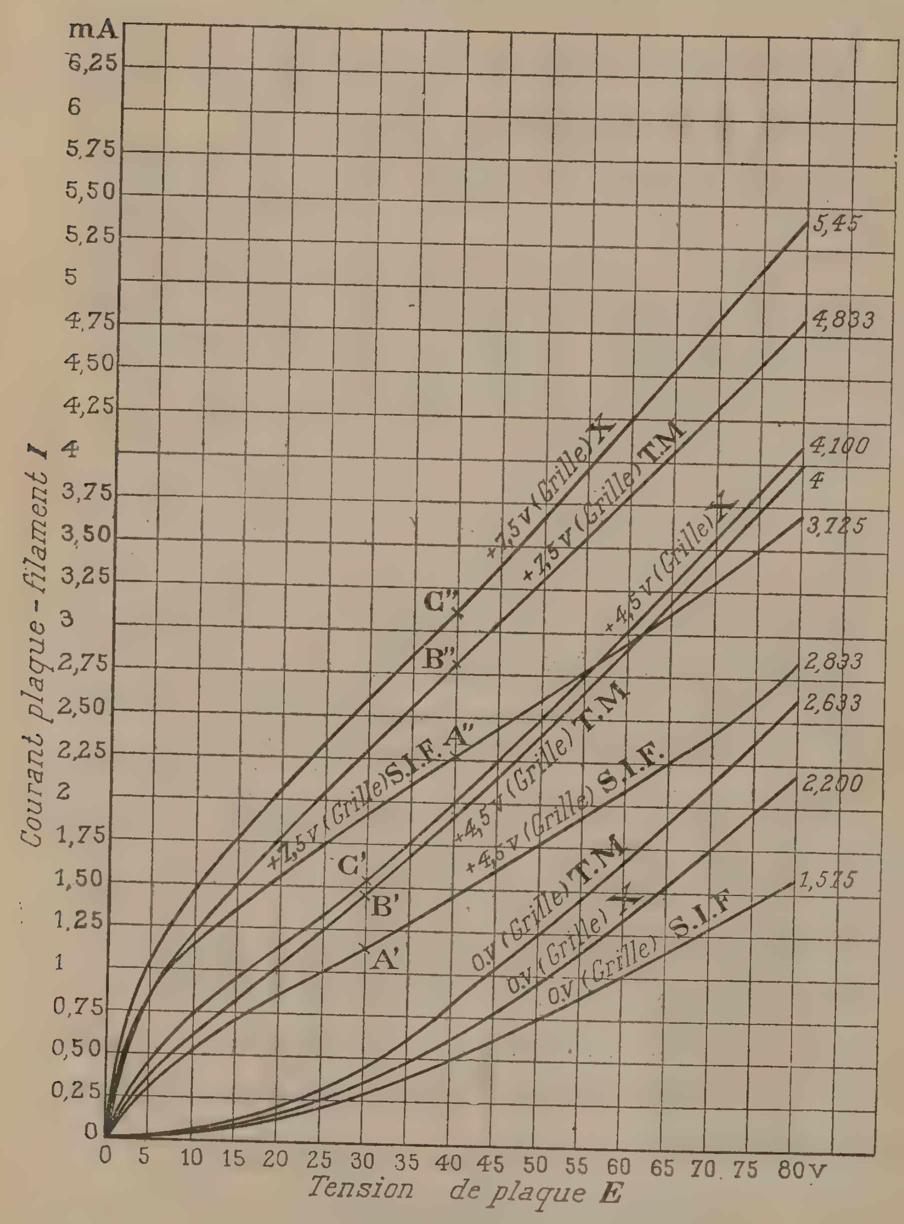


Fig. 133.

La fig. 133 reproduit les caractéristiques de plaque de ces 3 valves, essayées respectivement sous les tensions de grille : 0 volt ; 4,5 volts : et 7,5 volts. On remarque à l'examen des graphiques :

1° le *parallélisme* des courbes d'un *même type*, à partir des points d'inflexion ;

2° l'*accroissement* brusque du *coefficient angulaire* de la caractéristique de la valve (X), d'abord compris entre ceux des valves S.I.F. et T.M. ; dès que le potentiel de grille dépasse celui du filament, à 4,5 volts,

la courbe de (X) passe au-dessus des 2 autres ; l'émission électronique du filament X dont le courant de plaque I est fonction, est supérieure à celle des deux autres, à partir de la tension de grille : 4 volts.

La fig. 134 montre les caractéristiques du courant I' (en milliampères) du *circuit-grille filament* des 3 mêmes valves, pour une tension de plaque constamment égale à 80ᵛ; nous avons reproduit, sur la même figure, les courants de plaque I correspondants pour 80ᵛ également de tension de la plaque au filament obtenus dans les premiers essais, mais en fonction, cette fois, de la tension E' de grille. L'examen des courbes nous montre le *parallélisme sensible* des caractéristiques de plaque des valves SIF et T.M (filaments au *rouge-blanc, ou vif*) et fait voir que la caractéristique de plaque de la valve X croît plus rapidement que les 2 autres ; à 4, 5 volts, elle dépasse celle de la valve T.M. qui est au-dessus de la courbe de la valve SIF.

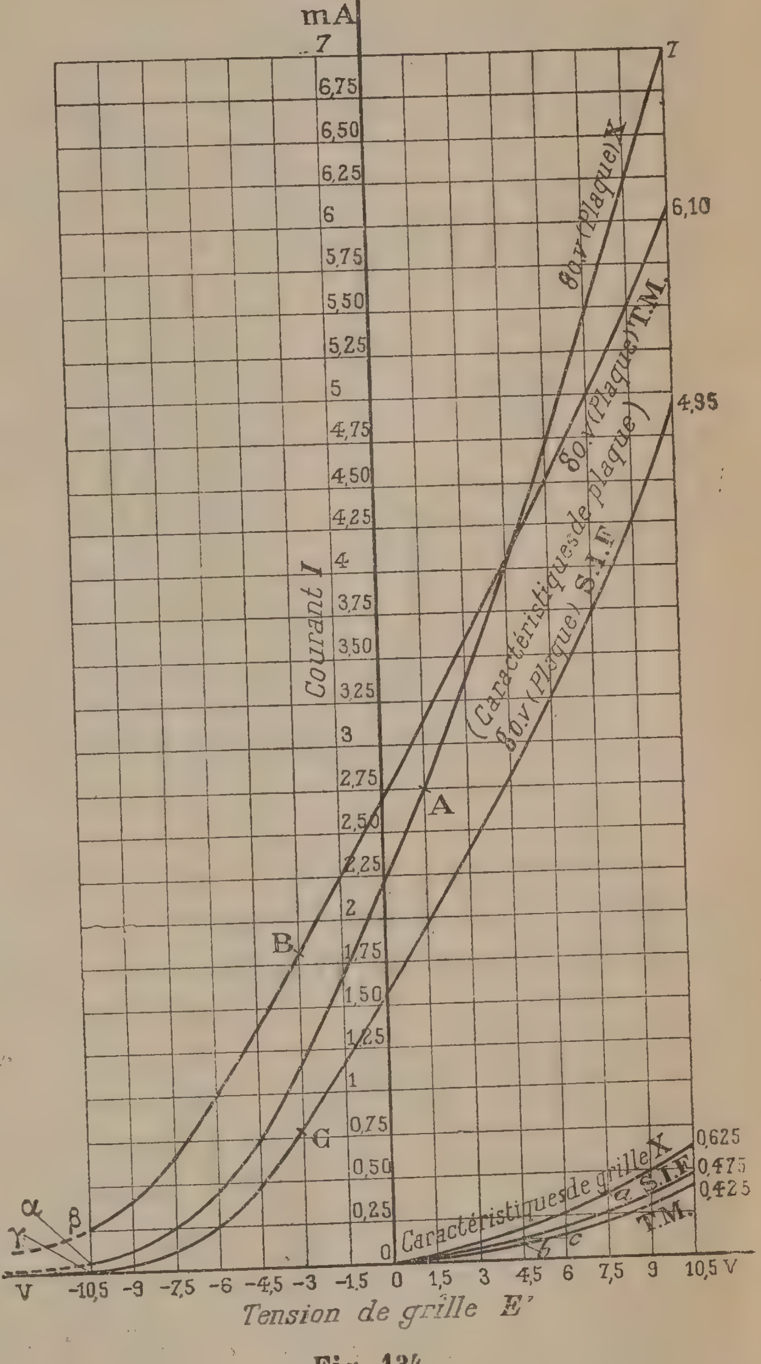


Fig. 134.

En considérant la courbure des 3 caractéristiques de plaque, on voit que le graphique de (X) tend à se *rectifier* seulement à partir de A (pour E' = 1ᵛ5 en grille), tandis que ceux des valves TM et SIF se rectifient respectivement en B et C (pour — 3 volts en grille). En ce qui concerne le courant I' (grille-filament) la rectification pour la lampe X a lieu en *a* seulement (pour E'=7, 5 volts), et en *b*, *c* pour les2 autres (E' = 4, 5 volts). Il est possible de tirer, de cette comparaison, des résultats intéressants au point de vue de l'emploi des valves en *détection*, ou en *amplification*, dans les postes récepteurs de T. S. F.

N. B. — La *Société Grammont de Lyon* (qui construit les valves Fotos), a fait les essais d'une valve ordinaire qui se rapproche beaucoup de la valve T. M. d'après sa *caractéristique de plaque*; elle fabrique aussi une valve *microtriode* (dont nous ignorons la construction), et dont la caractéristique de plaque s'intercalerait entre celles des valves S.I.F et X. (La *Sté Grammont* a la première, en fin 1914, sous la direction de M. Abraham, construit la *valve triode* sous sa forme actuelle).

230. *g*) **Valves de détection.** — Une valve est dite de *détection* (on la nomme alors *audion*) quand elle sert à la *réception* des courants de haute fréquence, qu'elle *redresse* comme nous l'avons montré, — comme sur la fig. 127, à laquelle nous allons nous reporter, en remplaçant par la pensée la *valve diode* D, par une valve triode, dont la grille serait reliée à la borne négative du circuit de chauffage du filament; nous l'avons dit déjà au § 222.

Le *circuit oscillant*, formé de la bobine B″ et du condensateur C, est intercalé, dans le cas d'une telle valve triode, sur le circuit qui réunit la grille, soit : 1° au pôle négatif de la batterie P′ de chauffage du filament, soit : 2°) au pôle positif de cette batterie.

Dans le *premier cas* (fig. 135) une résistance variable R, chauffée par une pile P″ en série avec elle, est intercalée entre la grille et le circuit oscillant, et permet de *diminuer* le potentiel de la grille par rapport au filament, à partir de 0 volt (on a donc des potentiels négatifs à la grille).

Fig. 135.

Dans le 2e cas, fig. 136, une *grande résistance* R (réalisée par une couche mince de métal déposée sur un tube de verre), plus grande que celle de l'intervalle grille-filament, est interposée au condensateur C sur le même circuit; dans ces conditions, le potentiel de grille est diminué, mais *demeure toujours positif* : c'est le dispositif le plus courant.

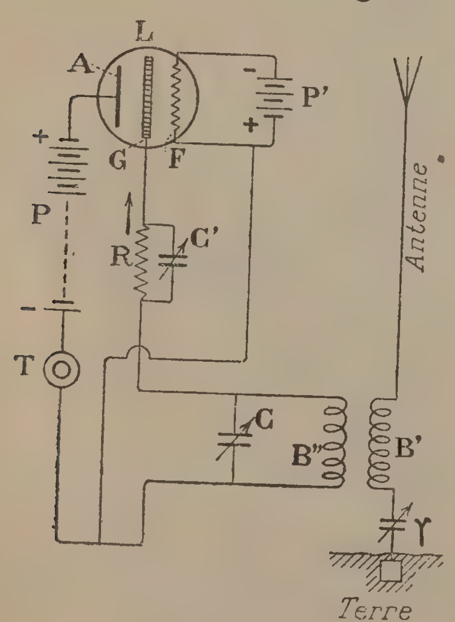


Fig. 136.

Dans le 1er cas, — qui utilise le courant plaque-filament avec potentiel négatif de la grille — on voit, à l'aide de la fig. 134, que l'*intensité moyenne* du courant, dans le circuit de plaque qui comprend le téléphone récepteur, sera davantage *amplifiée* par la valve (X), laquelle permettra en même temps une plus grande échelle de réglage (de α en A) que les 2 autres (de β en B, ou de γ en C). Dans le 2e cas, — celui qui utilise le potentiel (+) de la grille, — l'in-

tensité moyenne de ce courant sera augmentée; et la chute de potentiel de la grille, — due à la grande résistance que nous avons indiquée, — sera également augmentée: ce qui fera baisser davantage le courant dans le circuit plaque — filament, donc dans le téléphone disposé sur ce circuit et comme il convient; encore dans ce cas, et d'après la figure 134, la chute de ce courant plaque sera plus grande avec la valve (X) qu'avec les 2 autres.

231. *h*) **Valves d'amplification.** — Quand on emploie une valve thermoionique comme *relai-amplificateur*, le *secondaire* d'un petit transformateur *t* est disposé (fig. 137) sur le circuit : grille-borne négative de la batterie P' de chauffage, le *primaire* étant parcouru par les courants destinés au téléphone T, mais d'amplitude insuffisante pour l'actionner, et venant de la lampe détectrice par α, α'. La *f. é. m.* que les courants de la valve-détectrice vont faire naître par induction dans ce secondaire va produire des variations dans l'intensité du courant du circuit plaque, autour du potentiel *zéro* de la grille. Or, la caractéristique de plaque de la valve X (fig. 134) étant *plus inclinée* que les 2 autres, dans le voisinage du potentiel zéro de grille, elle fournira une plus *grande variation d'intensité* que celle des 2 autre valves, et il se produira une *plus grande amplification* des courants dans le téléphone du circuit plaque-filament.

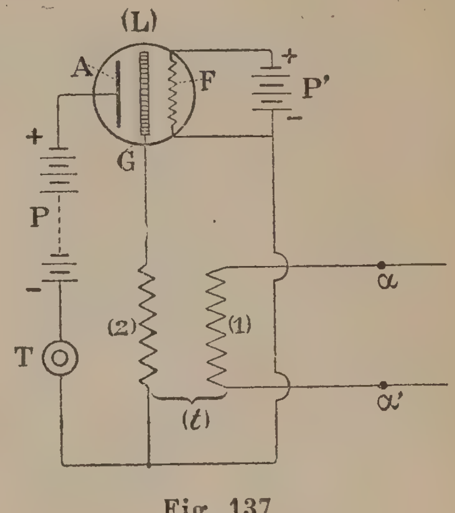


Fig. 137.

N. B. — La valve (X) présente ainsi une supériorité marquée sur les valves à filament de tungstène pur, au point de vue de l'intensité du courant électronique obtenu. L'expérience montrera si elle peut supporter la comparaison avec les autres valves, quant à la durée de son fonctionnement.

232. *i*) **Valve à électrode liquide.** — Elle se compose d'un filament-ordinaire F (fig. 138, schématique), d'une *anode liquide*, réalisée par un bain de *rhodium* en A, maintenu en fusion par

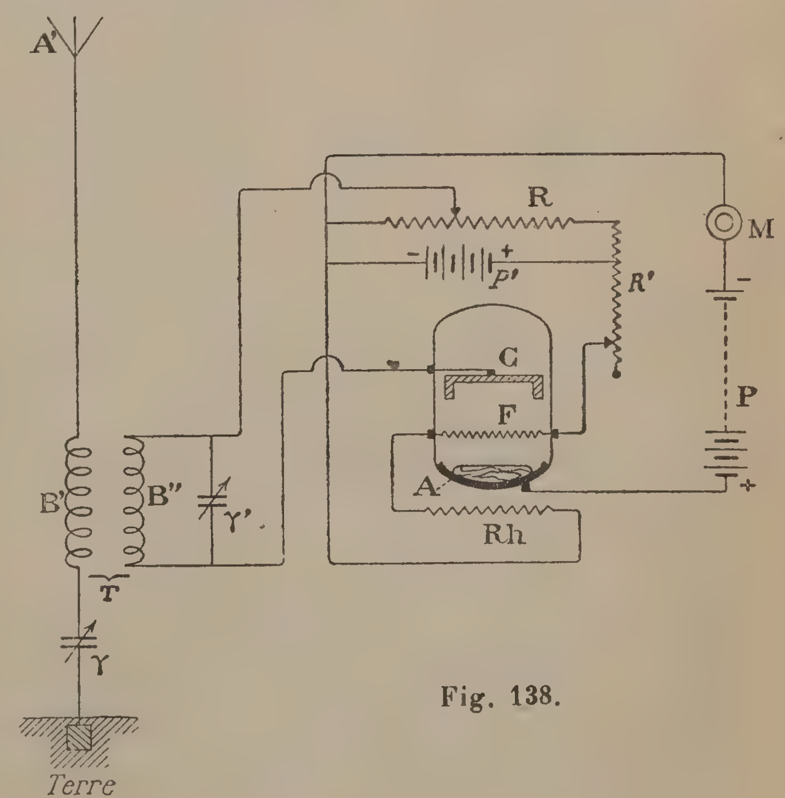


Fig. 138.

un rhéostat de chauffage électrique Rh, qui chauffe en même temps le filament (grâce à la batterie P'), d'une 3[e] électrode métallique C (collecteur d'ondes) en forme d'U, dont la concavité est tournée vers l'anode. On règle le potentiel de C (grille) à l'aide d'un potentiomètre R; la figure montre la disposition de cette valve sur le circuit de réception : antenne A'; transformateur de haute fréquence des ondes : T; condensateurs (γ et γ'); potentiomètre R, à curseur mobile; batteries P et P', téléphone M. Cette valve-audion éviterait la *déformation* des signaux, et le mélange des signaux de diverses stations; elle serait aussi sensible que les valves triodes au molybdène.

233. *j*) **Valve-émettrice d'ondes.** — Nous allons faire comprendre comment une triode peut être utilisée pour l'*émission d'ondes entretenues* à une antenne. La fig. 139 montre le dispositif adopté : P' est la batterie de chauffage du filament F; la plaque A est reliée au pôle (+) d'une batterie P, dont le pôle (—) est relié à l'antenne α, à une bobine B', et celle-ci à la terre (un ampèremètre d'antenne est en *a*); une 2[e] bobine B'' est reliée d'une part, à la grille G, par une résistance R et un condensateur γ, et d'autre part au pôle (—) de la batterie P' du filament, et à la terre. La batterie P est le *générateur de courant continu* qui va permettre le fonctionnement de la lampe-triode comme génératrice d'ondes.

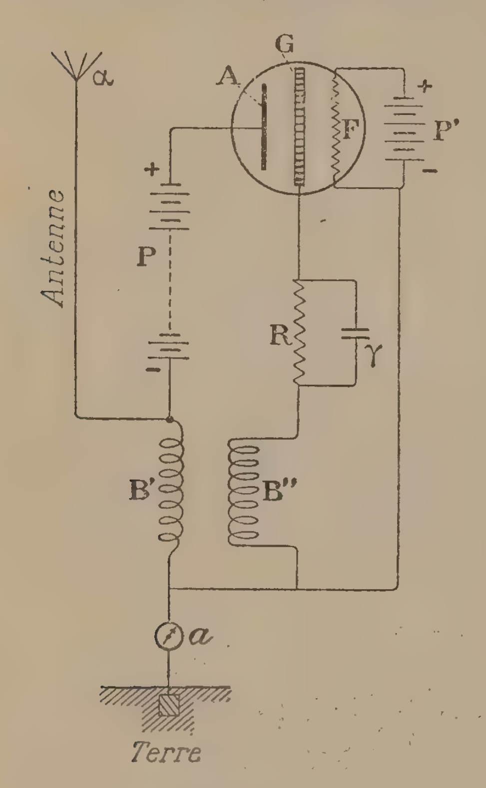


Fig. 139.

1° Dès que le filament est devenu *incandescent* (étant fermé sur le circuit de P') le courant de P passe dans l'intervalle plaque-filament, et dans le circuit oscillant (B'-antenne) : il produit une f.é.m. de self en B', et charge l'antenne; et l'on a un circuit en oscillation, en B'; d'où induction sur la bobine B'' voisine, et par suite variations de la tension de grille G, donc des variations périodiques de courant plaque-filament (revoy. *courbes des caractéristiques*); ce courant variable qui passe dans le circuit oscillant, y fait naître une f.é.m. de fréquence propre à ce circuit, et les oscillations sont entretenues ; pour que l'entretien des oscillations soit convenable, il faut bien régler l'induction entre B' et B'' pour que les variations de la tension de grille aient la phase convenable. Si la pile P fournit au circuit B', plus de puissance que celui-ci n'en absorbe, la faible oscillation due à la fermeture du circuit plaque-filament va croître en amplitude : d'où un accroissement de tension de grille, donc aussi du courant de plaque : et un accrois-

sement nouveau. Il arrive assez vite un moment où l'oscillation s'entretient à un régime d'intensité constante : c'est quand la tension de grille atteint la valeur qui correspond, sur une caractéristique de plaque (en fonction de E' ; fig. 134), à la région β B, par exemple (valve T. M.).

La résistance R (très grande) a pour but de réduire le courant dans le circuit grille (pour qu'il n'atteigne pas une trop grande intensité); le condensateur γ transmet directement à la grille les variations de tension à haute fréquence. On obtient, avec ce poste, des ondes ininterrompues et d'amplitude constante. — Dans les postes qui émettent avec des *triodes*, on emploie naturellement, comme générateur de courant continu, une dynamo réglée à tension constante aux bornes, et mise à la place de la batterie P (fig. 139).

2° En considérant que l'on n'utilise, dans le fonctionnement des valves, que les portions de caractéristiques sensiblement *rectilignes* (près du point B, pour la valve T. M ; fig. 134) on démontre aisément, par le calcul, que si V est la tension constante du générateur (en P) ; I_0, l'intensité du courant continu dû à ce générateur ; r, la résistance apparente de la valve (elle est *constante* pour toutes les valeurs de la tension E' de grille, comme on peut s'en rendre compte à l'inspection des caractéristiques de grille et de plaque, et l'on a : $r = \frac{\Delta E}{\Delta I}$) ; et si l'on pose : $\frac{\Delta E}{\Delta E'} = m$ (constante sensiblement); si E_0' est la tension de grille, constante avec le courant continu de plaque, U une tension de la plaque (opposée à V) *à l'origine* des caractéristiques (pour $E_0' = 0$), l'on peut écrire :

$$(64) \qquad r I_0 = V + m E_0' - U.$$

Si I' est l'intensité du courant oscillant obtenu dans le circuit plaque (il est superposé à I_0) ; E, la tension oscillante de plaque ; E', celle de grille, on a :

$$(64)' \qquad r\, I' = E + m E' \,;$$ (le courant I' dépendant de E et de E')

D'où, en additionnant membre à membre, on aura l'équation correspondant à la production des courants oscillatoires :

$$(65) \qquad r\,(I_0 + I') = V + E + m\,(E' + E_0') - U\,;$$ (I' est une fraction du *courant oscillant total*; l'autre fraction se rend dans le circuit oscillant comprenant l'antenne.

234. *k*) **Description de types de valves-émettrices.** α) **Type Holweck** (de grande puissance). — La fig. 140 montre la coupe d'une triode Holweck de *10 kilowatts* (en service au poste de la Tour Eiffel).

Le filament F est porté par 2 tiges de nickel fixées sur une pièce métallique ; le courant est conduit à l'une de ces tiges par une électrode

bien isolée H; l'autre tige I est réunie à la masse; ce filament est tendu par une tige de molybdène en 2 parties isolées et repoussées par un ressort; la grille G, en molybdène, est portée par un anneau fendu pénétrant à frottement dans le manchon B, en verre; elle est munie d'une électrode C, pour les connexions à établir. L'anode D est cylindrique, et en cuivre rouge; elle est refroidie par une circulation d'eau (introduite par l'ajutage E). Des joints J en forme de bagues de caoutchouc sont placés autour du manchon B, et du tube K (canal d'aspiration.)

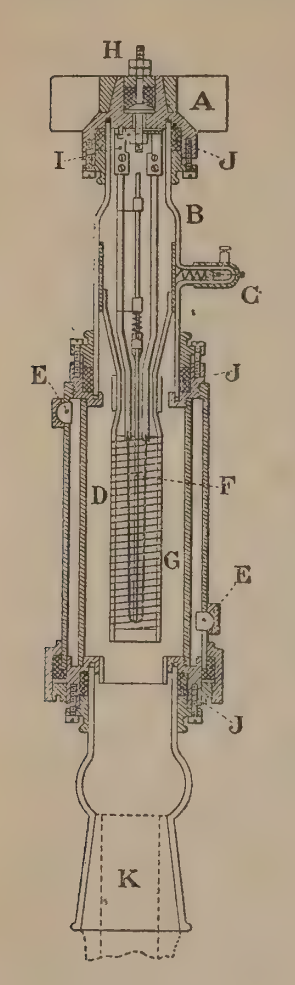


Fig. 140.

Caractéristiques : *filament* constitué par 2 baguettes de tungstène de 18 cm. de longueur et $\frac{1}{2}$ mm. de diamètre, disposées en parallèle; courant de chauffage : 36ª.; courant électronique (à la saturation) : 6 ampères. Température du filament : 2400° environ (centigrades); *grille*, en hélice de 18 mm. de diamètre, avec un pas de 3 mm. obtenue avec fil de molybdène de 0 mm. 4 de diamètre; *anode* : 45 mm. de diamètre; 11 cm. de longueur.

Cette triode qui est une valve émettrice, fournit à l'antenne de la Tour Eiffel, une puissance de 8 kilowatts (35 amp.), avec une tension plaque-filament de 5.000 volts; ou une puissance de près de 6 kw. (30 ampères), avec une tension de 4.000 volts. On met en marche cette puissante triode après avoir mis en action la pompe à vide; le vide est entretenu *en permanence* par une puissante pompe moléculaire hélicoïde, dans une telle valve où le vide ne pourrait être fait *a priori*; car il est impossible de la purger de gaz, à cause de ses joints, — qui ne peuvent remplacer des soudures, impossibles d'ailleurs avec de pareilles dimensions de valve; — le vide entretenu dans la valve est de l'ordre du *centième de barye* (1 *barye* est la pression de 1 *dyne* par *c. m.*^{2}; elle correspond à $\frac{3}{4}$ de micron.) — On change le filament tous les mois avant son usure complète).

235. β). **Types de la Cie des lampes.** — Les *valves émettrices* d'ondes ont la *plaque* et la *grille* en *molybdène* (Cie des Lampes); on construit ces lampes pour des puissances (absorbées) de 10 à 12 watts, avec tension de plaque maxima de 500 volts; chauffage par 2ª,8 sous 4 volts (filament de tungstène); — et pour des puissances de 4 à 6 watts seulement, avec tension maxima de plaque de 300 volts; chauffage par 0ª25 seulement sous 4 volts (filament de tungstène-thorium.); — pour des *puissances plus grandes* : 50 à 85 watts, et à cause de la nécessité

d'isoler la plaque de la grille (tension de plaque; 1.200 volts), les ampoules sont pourvues de 2 cornes en verre, soudées au préalable avant la fermeture, et munies de 2 électrodes correspondant l'une à la plaque, l'autre à la grille (fig. 141). Pour des *puissances plus grandes* encore (80 à 700 watts absorbés, avec tension de plaque de 1.000 à 5.000 volts), l'ampoule est cylindrique, et les 3 électrodes solidement maintenues par des baguettes de nickel.

γ) **Types Fotos (Sté Grammont).** — Cette société construit *2 types* de valves-émettrices; l'un avec un courant de chauffage sous 5^v5, une tension de plaque de 600 volts et une tension de grille de 40^v; puissance absorbée : 20 watts; l'autre, avec un courant de chauffage sous 5^v5, une tension de plaque de 1.200 volts, une tension de grille de 40^v, et une puissance absorbée de 40 à 45 watts.

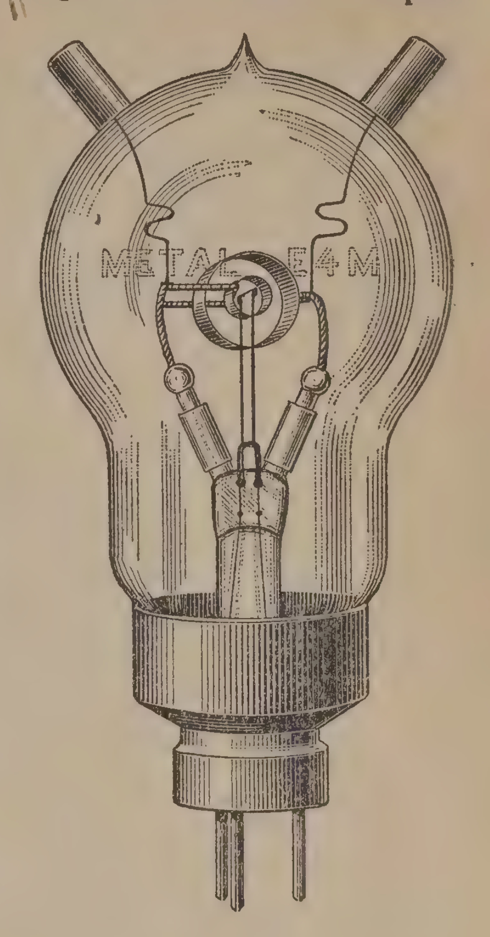


Fig. 141.

236. *l*) **Valves spéciales.** — Outre les *valves triodes* que nous venons d'étudier, et dont nous avons indiqué les emplois divers (détection, amplification, émission) il existe des *dispositifs spéciaux* dont nous allons dire quelques mots : il s'agit du *dynatron*, du *négatron*, et des *valves pour ondes courtes*.

α) **Dynatron.** — Il se compose, comme une valve triode, d'un filament, d'une grille, d'une anode cylindrique qui les entoure; mais il présente cette *caractéristique importante* que la grille est placée *très près du cylindre*, de sorte qu'elle joue le rôle d'anode, et le cylindre le rôle de *dynode*.

Les électrons émis par le filament se déplacent librement *à travers* cette grille-anode, et viennent frapper le cylindre-dynode; ce choc engendre des *électrons secondaires* qui sont attirés par la grille. Les électrons frappant la plaque-dynode avec une grande vitesse, certains électrons de la surface de plaque peuvent s'échapper; ce nombre d'électrons libérés croît avec la *vitesse* de l'*impact*, et peut être supérieur à celui des électrons primaires (W. Hull; E. Hennelly; R. Elder); il en résulterait que le courant vers la plaque aurait son *signe inversé*.

Si, par exemple, chaque électron de choc en libère deux, et que ces deux électrons se portent sur une *autre électrode*, la plaque aura perdu des électrons au *total*. C'est donc la *dynode* qui émet ces *électrons de choc* (électrons secondaires) ainsi libérés. Si l'on dispose d'une autre

électrode à potentiel plus élevé que celui de la dynode, et qui par conséquent captera les électrons secondaires, aussi rapidement qu'ils sont émis, on utilisera ainsi l'émission par choc ; cette électrode devra être à haut potentiel, et près de la dynode : ce sera la grille dont nous avons parlé précédemment : cette valve est un **Dynatron**. — Un **pliodynatron** est un dynatron qui renferme une 2e grille (dite de *contrôle*), très près du filament.

On utilise le pliodynatron comme *détecteur* d'ondes (fig. 142) ; on voit nettement les connexions des 4 électrodes avec le circuit (L-C-R) du téléphone accordé ; la batterie à haut potentiel en P ; un curseur

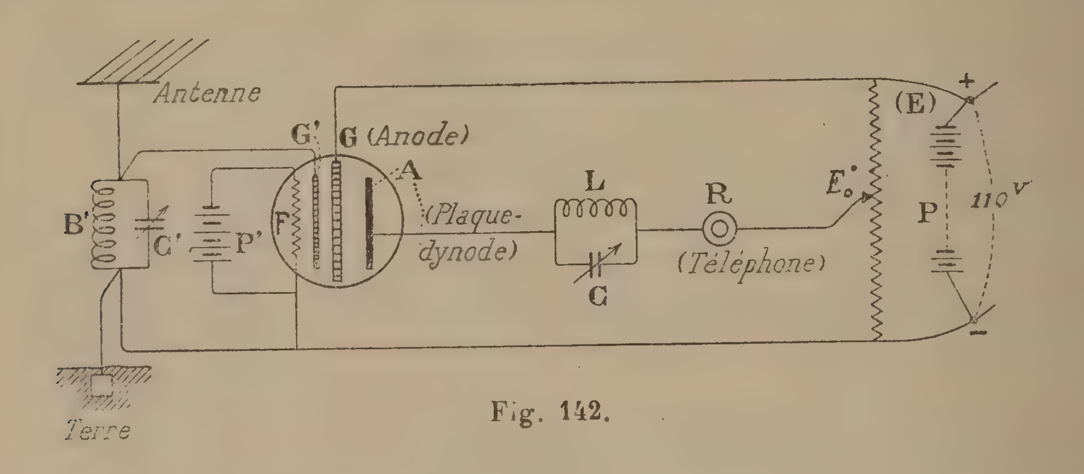


Fig. 142.

qui place la dynode à un potentiel E′ inférieur à celui de l'anode-grille G (en E'_0 ce potentiel correspond à un courant de dynode *nul*) ; la grille G′ (de contrôle) est reliée au circuit oscillant de réception (Antenne, B′,C′.)

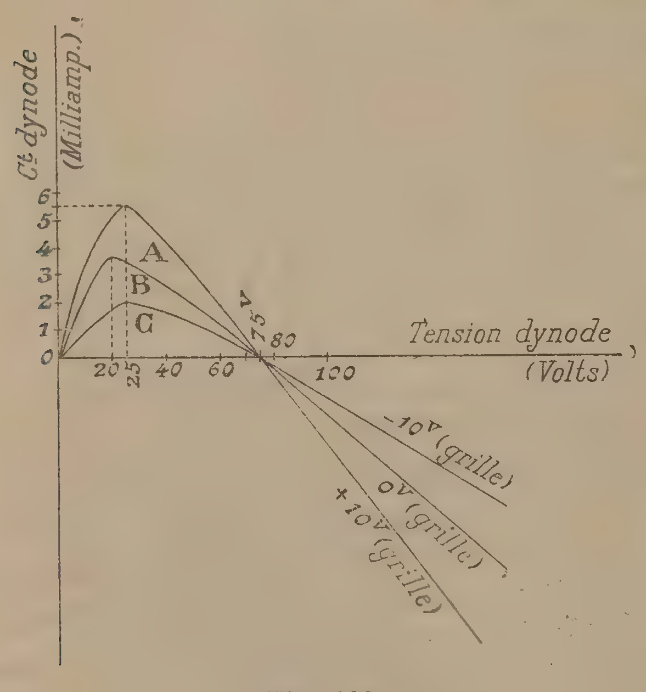


Fig. 143.

On obtient, avec ce dispositif, une détection très constante ; et le fonctionnement reste le même, que le filament soit chauffé par courant continu, ou courant alternatif. Si l'on construit les caractéristiques du courant dynode, en fonction du potentiel E′ de cette dynode, et en faisant varier le potentiel de la grille de contrôle G′ de — 10^v à 0^v, et de 0^v à + 10^v, on constate que l'*amplification* obtenue de —10^v a 0^v est *plus faible* que celle obtenue de 0^v à + 10^v ; la fig. 143 le montre aisément. La tension de grille-anode G valait 475 volts, et le courant de chauffage du filament 1^a65, dans cet essai.

β) **Négatron.** — C'est une valve à 4 électrodes : 2 anodes A_1A_2 (fig. 144), dont la forme est aplatie, de chaque côté du filament F, auquel elles sont reliées séparément par une batterie spéciale : P_1 ou P_2; la grille G, entre F et A_2 (la plus grande anode, dite : *de diversion*) est plate ; elle est reliée par une batterie P′ à l'anode principale A_1, plus petite que A_2.

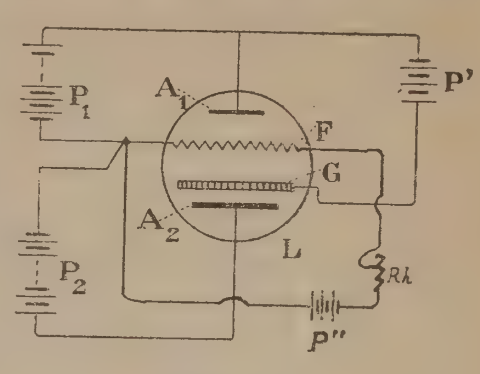


Fig. 144.

Si G est rendue plus positive par rapport au filament, on *détourne* une partie des électrons destinés à A_1, vers A_2; d'où réduction du courant (anode A_1-filament) ; on obtient ainsi le même effet qu'avec une résistance négative : d'où le *nom* de la valve.

On utilise le négatron pour la transmission ou la réception des ondes entretenues ; — en réduisant l'effet de résistance positive (puisqu'il donne un effet de résistance négative), il convient pour la réception des *ondes amorties*, il oscille sur toutes les longueurs d'onde comprises entre 500 m. et 20 kilomètres ; (d'après J. Scott).

237. γ) **Valves pour ondes courtes.** — 1° Les valves d'émission pour *ondes courtes* (de 50 m. à 200 m., par exemple) de la *Cie des Lampes-Métal*, ont l'aspect de la fig. 141, mais avec les dimensions d'une lampe ordinaire de 100 bougies (longueur totale = 12 cm. ; diamètre de l'ampoule : 5 cm. 5) ; elles fonctionnent sous une tension de 500^v (plaque-filament), avec un courant de chauffage de $2^a,8$ sous 4^v, absorbant 10 à 12 watts, avec 5 à 7 watts oscillants.

2° Quand on veut obtenir des *ondes très courtes* (de 2 m. à 4 m. 50) on emploie des valves disposées selon les indications de B. Grill et J. H. Morrell ; — plaque et grille en molybdène ; ampoule dure (à *vide très poussé*) ; la *plaque* est maintenue à une tension constante de 2 volts seulement; le filament est chauffé sous une faible tension (voisine de celle de la plaque) ; la grille est soumise à des tensions pouvant varier de 20 volts à 160 volts.

La longueur d'onde obtenue avec une telle valve dans un circuit oscillant (connecté à la grille et à la plaque) dépend *avant tout* de la tension de grille, mais aussi du potentiel de plaque et de l'émission électronique ; le courant électronique obtenu ne dépasse pas 6 milliampères. Voici les longueurs d'onde λ (en *mètres*) relevées par les auteurs en fonction de la tension E′ de grille (en *volts*) :

E′	36,5	50,8	68,5	92,5	122,5	156,5
λ	4,50	3,66	3	2,60	2,33	2

On voit que la longueur d'onde *décroît* quand la tension de grille croît ; il est à remarquer que le produit : $\lambda^2 \times E'$ demeure à peu près *constant*, et voisin de 7×10^2. On obtient des oscillations continues dans le circuit oscillant.

N.B. — Ce dispositif est intéressant à retenir, pour la solution définitive du problème de l'émission par ondes courtes, — très recherchée actuellement.

5° MESURE DU VIDE (dans les tubes et les valves).

238. — Pour mesurer le vide très poussé des tubes (de Geissler, de Crookes) et des valves (à mercure, kénotron, ou triodes) et vérifier que ce vide a été obtenu pendant le pompage de la valve, et avant sa fermeture, on emploie l'une ou l'autre des méthodes suivantes :

α) *Indicateur manométrique* (de *Mc. Leod*). — La fig. 145 montre le dispositif employé : un tube manométrique à mercure est pourvu d'un réservoir à mercure R (ouvert à l'air extérieur), relié par un siphon en caoutchouc à une petite ampoule sphérique *c* (de volume bien repéré : V), surmontée d'un tube fermé capillaire *b*, bien calibré et pourvu d'une graduation sur une règle E qui le maintient ; une 2e tubulure *l a*, permet de relier l'appareil à l'ampoule de la valve où *l'on vient de faire le vide* (à une pression qu'il s'agit de déterminer : x en millimètres de mercure) ; l'indicateur, dans la position (α), communique donc par *l a*, avec l'ampoule de valve où le pompage est terminé ; la hauteur de mercure soulevée H est un peu inférieure à une atmosphère, on le conçoit (elle vaut : 760 mm. — x) ; le petit ballon *c* s'emplit alors du mélange de gaz et d'air raréfiés de l'ampoule de valve, sous le volume V et la pression x que ce mélange y exerce actuellement, et qu'il s'agit de calculer. Or, un tel mélange ayant nécessairement une densité très faible, sera *aisé à comprimer ultérieurement*. Ceci posé, si l'on continue à faire le vide (avec la pompe à huile) par la tubulure *l a*, le mercure descendra en R, et montera en *l* et en *c b*, en comprimant la petite masse renfermée initialement en *c* ; on opère (1) jusqu'à ce que le mercure ait pris le niveau, dans la branche *l*, qui corresponde au sommet *b* du petit tube calibré ; la masse du mélange de gaz et d'air occupe actuellement le *volume u* (représenté

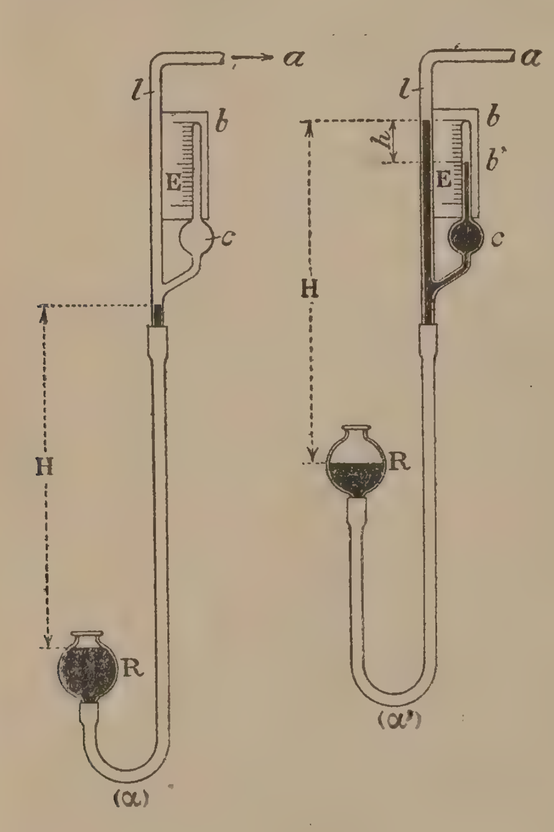


Fig. 145.

(1) En *soulevant* le réservoir R (position α').

par la *portion* $b'b$ du tube, et que l'on connaît par le calibrage de ce tube), sous une pression *sensiblement égale* à h (*longueur* $b'b$, en admettant qu'actuellement le vide ait été poussé assez loin, en fin d'opération, pour négliger la pression dans le tube l au-dessus du mercure) ; la loi des gaz permet d'écrire :

(66)' $uh = Vx$; d'où la pression cherchée :

$$x = \frac{u}{V} h. \qquad (66)$$

On peut calibrer ensuite — après quelques essais — l'échelle E en valeurs de h, et dresser un tableau qui fournira immédiatement, à la lecture de h, les valeurs de x.

Cet indicateur fournit le vide à $\frac{1}{100}$ de micron près ; c'est l'appareil le plus sensible comme indicateur de vides très poussés. Pour l'employer sur une pompe à vide, on le recouvre d'une enveloppe métallique très résistante, pourvue de robinet (pour le tube $l\,a$), et d'une fenêtre permettant de lire sur l'échelle E.

239. β *Indicateur bolométrique.* — Il est moins sensible que le précédent et ne donne le vide qu'à $\frac{1}{100}$ de millimètre (10 microns). Il se compose (fig. 146) d'un tube L renfermant une spirale mince de platine (dont la résistance à 0° est de 25 ohms), et pouvant être mis en relation, par la tubulure T, avec l'ampoule de valve où l'on vient de terminer le pompage, donc avec les gaz raréfiés de cette ampoule ; les extrémités (α, α') de la spirale (soudées au verre du tube L, qui est fermé à sa partie supérieure, bien entendu) sont reliées à une branche d'un pont de Weahtstone, pourvu de 3 boîtes d'ohms étalonnées (r_1, r_2, r_3), d'une batterie d'accumulateurs (de 3 à 4 volts) : B, et d'un milliampèremètre M.

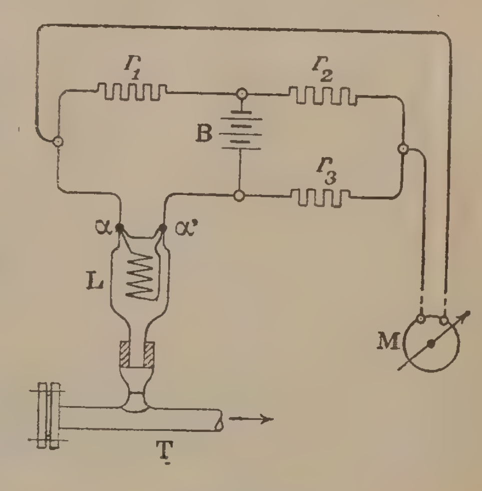


Fig. 146.

La résistance (y) entre α et α', de la spirale, quand les résistances (r_1, r_2, r_3) sont réglées pour qu'il ne passe *pas de courant* dans le milliampèremètre (on agit, à cet effet, sur la boîte r_3, en laissant fixes les résistances r_1 et r_2, égales entre elles d'ailleurs ; la boîte r_3 étant pourvue d'assez de résistances faibles pour obtenir un équilibrage à $\frac{1}{100}$ d'ohm près), est donnée par la relation connue du pont de Weahtstone :

$$y = r_3 \times \frac{r_1}{r_2}. \qquad (67)$$

Or, l'on sait que la *conductibilité* thermique des gaz raréfiés (qui communiquent avec le tube L, donc avec la spirale) est d'autant plus faible que la *raréfaction est plus grande*; et que la résistance d'un métal décroît avec la température; la conductibllité thermique décroissant (par le vide), la résistance dans la spirale doit décroître, avec le vide de plus en plus poussé.

Des *essais préliminaires* permettent de dresser un tableau indiquant, en face des valeurs de la résistance de la spirale, les valeurs correspondantes de la pression dans le tube L, — donc dans l'ampoule de valve essayée, et en relation avec ce tube.

Remarque. — Nous avons dit comment les *tubes à vide* (de Geissler, de Hittorff) et le *tube de Crookes* lui-même, — dont la pression intérieure est très faible, et de l'ordre de celle des lampes à éclairage, — sont employés comme *indicateurs de vide* dans la fabrication des lampes (au carbone ou au tungstène); — ce sont des témoins très précieux, et d'un usage plus commode que celui des appareils qui viennent d'être décrits : leur indication étant *visible*, puisqu'elle est fournie par une luminescence, — ou l'absence de luminescence, — selon le vide à obtenir.

6° Evaluation des températures (des surfaces incandescentes).

240. — Pour évaluer la température d'une *cathode incandescente* (du tube de Coolidge, du kénotron, d'une valve-tungar, d'une valve-triode), on peut employer *les pyromètres* de H. Le Châtelier, ou de Holborn et Kurlbaum (revoy. §§ 59 et 60), que nous avons décrits à propos des lampes à incandescence. Nous allons exposer la méthode du pyromètre de M. A. Blondel, lequel est d'usage plus pratique.

a) **Pyromètre de M. A. Blondel.** — Il permet de supprimer les inconvénients du pyromètre de Holborn et Kurlbaum, qui a besoin d'un nouvel étalonnage chaque fois que l'on remplace la lampe à incandescence (de comparaison). L'étalonnage est, en effet, fonction des *propriétés* de la lampe (nature du filament, nature de l'atmosphère de l'ampoule); il varie donc avec le type de lampe utilisé; et la courbe d'étalonnage est compliquée.

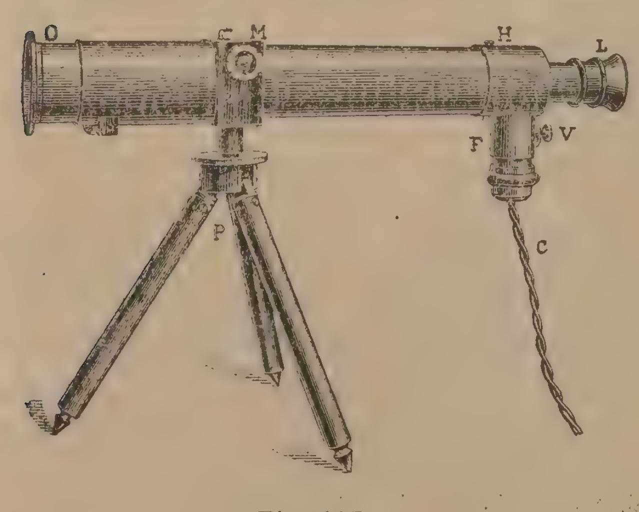


Fig. 147.

Dans l'appareil de A. Blondel, le tarage de la lampe est plus facile, comme nous allons le montrer. Il se compose (fig. 147) d'un tube métallique OL noirci intérieurement, et pourvu d'un objectif à tirage O ; d'un œil-de-chat pour limiter

les rayons émis, avec micromètre (en M); d'une loupe-composée L, pour examiner l'image de la surface incandescente. La *lampe à incandescence,* disposée dans le tube vertical F, est reliée par cordons conducteurs C, à une batterie de 2 ou 3 éléments (d'accumulateurs, ou de piles sèches); un rhéostat intercalaire permet de *régler la tension* de la batterie; donc la tension aux bornes de la lampe, et par suite *son éclat.* L'appareil est monté sur un trépied P, articulé.

On vise la surface incandescente (en face de O), dont l'image se forme en H; dans le plan de cette image, on amène le filament de la lampe de comparaison, à l'aide d'une vis de rappel V. On manœuvre le micromètre M, pour obtenir l'égalité d'éclat du filament et de la surface incandescente, et on lit le nombre de divisions du micromètre : n. Une formule, que nous donnons un peu plus loin, permet d'en déduire la *température absolue* T de la surface en question.

241. *b*) **Etalonnage.** — On applique la *loi de Wien* (§§ 12. *k*; et 16. *d*), c'est-à-dire que l'on détermine la température absolue d'un corps incandescent, à l'aide de son pouvoir émissif dans le rouge; celui-ci se déduisant du pouvoir absorbant mesuré à l'aide d'un pyromètre thermo-électrique et d'une lame métallique absorbante (recouverte de noir de fumée).

— On peut encore opérer directement comme il suit : la lampe F étant réglée par la tension aux bornes, on dispose devant l'objectif O, une surface incandescente à température absolue *connue* (T_1), — un bain de métal maintenu en fusion, par exemple —; on agit sur le micromètre M pour régler l'*ouverture* de l'œil-de-chat : soit (n_1) le nombre de divisions à cet effet, et fournissant l'égalité d'éclairement. On recommence l'expérience avec une autre surface incandescente à température absolue *connue* (T_2) — du même ordre de grandeur que (T_1) — ; soit n_2 le nombre de divisions obtenu au micromètre. En comparant les résultats trouvés, l'on constate que les *inverses* : $\frac{1}{T_1}$, $\frac{1}{T_2}$ sont des *fonctions logarithmiques* des nombres (n_1) et (n_2). M. A. Blondel a donc posé la relation suivante, qui traduit les résultats dans tous les cas:

(68) $$\frac{1}{T} = a + b \log n$$: c'est l'équation d'une *droite* ; a et b sont 2 constantes qui dépendent de l'appareil, et de la lampe. Pour tracer cette droite, on emploie un papier réglé à abscisses logarithmiques (c'est-à-dire que les nombres entiers représentatifs des valeurs de n sont repérés, en abscisses, par leurs *logarithmes décimaux*, comme sur une *règle à calcul*) ; on porte les log. n_1 et log. n_2 en abscisses ; aux points correspondants, on élève des ordonnées, sur lesquelles on porte respectivement les valeurs des inverses : $\frac{1}{T_1}$ et $\frac{1}{T_2}$, à une

échelle convenable ; — à cause des très faibles valeurs des quotients $\frac{1}{T}$, qui sont de l'ordre des *millièmes*, nous avons adopté de porter en ordonnées (fig. 148) les longueurs : $\frac{1}{T} \times 4.000$, que nous faisons figurer en centimètres — ; on obtient ainsi 2 points : N_1 et N_2 de la droite AC, qui se trouve déterminée. La constante b de la formule (68) est fournie par le coefficient angulaire de la droite, divisé par 4.000 ; la constante a est égale au quotient, toujours par 4.000, de l'ordonnée à l'origine : OA (ce qui correspond à log. $n = 0$, soit à : $n = 1$).

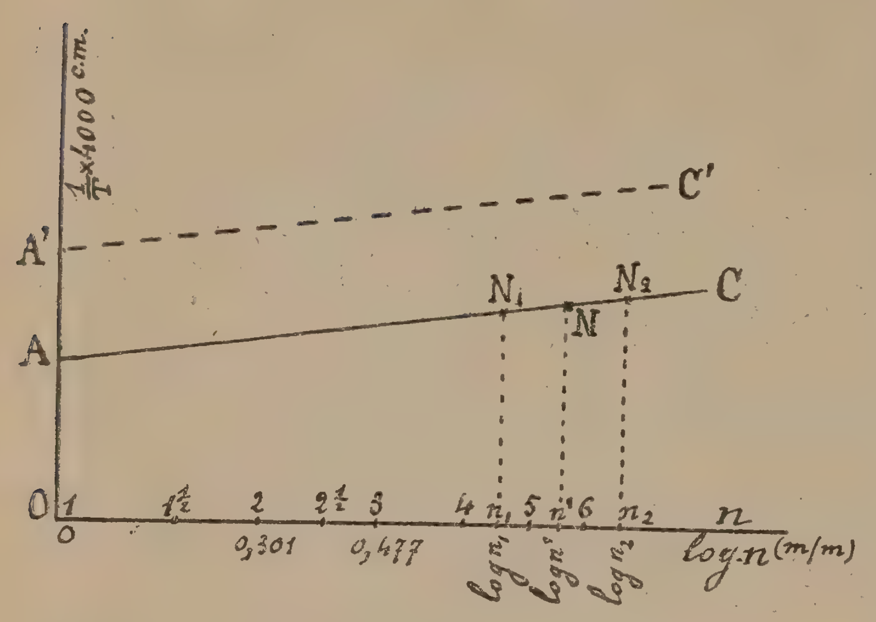


Fig. 148.

(Echelle des log. n : 1 millimètre vaut 0,016.)

N. B.— On voit (form. 68 ; et fig. 148) que n est d'autant *plus faible* que T est *plus élevée*, c'est-à-dire que *l'éclat* de la surface incandescente est plus grand.

242. *c*) **Usage de la Courbe.** — L'essai fait pour déterminer la température d'une cathode incandescente (valve-triode) a fourni $n' = 5{,}53$; d'où : log. $n' = 0{,}743$; l'ordonnée correspondante mesurée sur le graphique donne : $n'N = 2$ cm. 10 ; d'où : $T' = \frac{4.000}{2{,}10} = 1905°$ (absolus) ; ou : 1.632° centigrades.

Remarque. — Si l'on veut évaluer des températures d'un autre ordre de grandeur (inférieur au précédent), il faut faire un autre tarage du pyromètre ; pour cela, il suffira de *réduire l'éclat* du filament dans un rapport représenté par *un nombre entier* ; on y parvient, par tâtonnement, en choisissant une *tension* convenable aux bornes de la lampe. — On obtient, dans ce 2e cas, une droite représentative A' C', *parallèle* à la première (le coefficient b de la formule 68 n'a pas changé).

d) **Avantages de la méthode.** — Ils sont évidents : 1° il est *inutile* de tracer une courbe empirique complète pour toutes les températures (courbe qui donnerait directement les valeurs de T en fonction de n) ; 2° *deux points* suffisent pour déterminer un graphique (*linéaire*) correspondant à un certain éclat de la lampe de comparaison ; 3° *un seul point*

suffit pour tracer le graphique correspondant à un *autre éclat* de la lampe; — puisque tous ces graphiques sont parallèles.

Le pyromètre A. Blondel est donc véritablement un appareil industriel, et d'usage commode quand il est accompagné de son graphique d'étalonnage.

FIN

BIBLIOGRAPHIE

1. A. Blanc ; *Rayonnement; principes scientifiques de l'Eclairage ;* Librairie A. Colin, Paris; 2. C. Gutton ; *Télégraphie et Téléphonie sans fil* ; Librairie A. Colin, Paris ; 3. G. Claude ; *L'Eclairage au néon ;* Société internationale des Electriciens ; Bulletin n° 9 ; Tome I ; 3e série ; 4. G. Johannès ; *Le kénotron ;* Revue générale de l'Electricité ; 14 juin 1919 ; 29 mai 1920 ; 5. Dr Sch ; *Le Redresseur à vapeur de mercure pour grand débit ;* Revue B. B. C. ; 1919 ; et Notice de la Cie électro-mécanique ; 6. C. Violland ; *Les derniers progrès dans l'incandescence électrique* ; La Science et la Vie ; N° 36 ; janvier 1918 ; 7. H. Pilon ; *Le tube Coolidge* ; Masson et Cie, Editeurs, Paris ; 8. P. Reboux ; *La triode Holweck* ; Radio-Electricité ; n° 17 ; Tome IV (1923) ; 9. L. Jouenne ; *Fabrication de la lampe de T. S. F.* ; La Nature ; N° 2565 (1923) ; 10. J. Wetzel ; *Etablissement d'un projet d'éclairage ;* Revue générale de l'Electricité (22 et 29 déc. 1923) ; 11. Divers ; *Revue générale de l'Electricité ;* années : 1919 à 1924 ; 12. M. Enoux ; *Les Redressseurs de courant ;* T. S. F. Revue (avril 1924) ; 13. *Notices et Catalogues des Constructeurs ;* Cie des lampes-métal ; — Cie lorraine des charbons et lampes ; — Hewittic-électric C° ; — Etablissements Visseaux ; — Société Lacarrière ; — Etablissements Bardon ; — Société des Etablissements Ducrétet ; — Etablissements Gaiffe-Gallot et Pilon ; Etablissements Paz et Silva ; — Société anonyme française Holophane ; — Société anonyme « la lampe Philips » ; — Etablissements E. C. Grammont ; et A. Grammont ; 14. H. Pécheux ; *Du régime de fonctionnement électrique des lampes au tungstène en atm. gazeuse ;* Revue générale d'Electricité ; mai 1919 (n° 19), et août 1922 (n° 7) ; 15. H. Pécheux ; *Contribution à l'Etude des valves thermoïoniques ;* Rev. génér. de l'Electricité ; juillet 1924 ; n° 4 ; 16. H. Pécheux ; *Traité d'Electricité industrielle* ; T. I et II ; Delagrave, Editeurs, Paris.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE III

Tubes à vide

(luminescents ; et non luminescents)

CHAPITRE IV

Valves électriques

FIN DE LA TABLE

TABLE DES ERRATA[1]

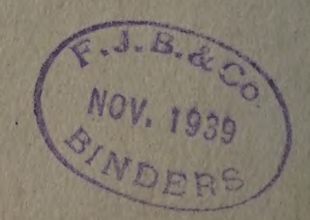
Pages.	Lignes.	Au lieu de :	Lire :
11	20e	e (corps gris)	e_m (corps gris)
12	5e	d'onde λ'^m	d'onde λ'_m
14	16e	valeur que T.	valeur de T.
21	17e	2.238×10^{-3}	$2{,}238 \times 10^{-3}$
23	11e	$T^{4/3}\, p = {}_e\left(C - \frac{0{,}218\,\lambda_0}{T}\right)$	$T^{4/3}\, p = e^{\left(C - \frac{0{,}218\,\lambda_0}{T}\right)}$
25	15e	et la paroi C	et la paroi C′
46	dernière	et qui est $\frac{E_1}{r'}$	et qui est $\frac{E_1}{r'}$
50	6e	$+ \frac{0.0025}{0.2800}$	$+ \frac{0{,}0025}{0{,}2800}$
50	33e	de $\frac{1}{0}$, $\frac{2}{10}$ et $\frac{5}{10}$	de $\frac{1}{10}$, $\frac{2}{10}$ et $\frac{5}{10}$
51	11e	$R_0 \quad \frac{R_{15}}{1 + 0{,}0054 \times 15}$	$R_0 = \frac{R_{15}}{1 + 0{,}0054 \times 15}$
58	7e	(27) $E' = \frac{Q}{S}$	(27′) $E' = \frac{Q}{S}$
60	22e	source de I au centre	source de $I^{b.d}$ au centre
61	21e	(30) F′ =	(30′) F′ =
61	25e	(30′) Flux en lumens =	(30) Flux en lumens =
62	2e	source de I qui...	source de $I^{b.d}$ qui...
65	7e	longueur d'onde 0 μ.	longueur d'onde 0 μ 4
68	13e	$\frac{1}{h_0} = \frac{}{h'_1} \times \frac{h'_1}{h_0}$;	$\frac{1}{h_0} = \frac{1}{h'_1} \times \frac{h'_1}{h_0}$;
70	32e	cale P , invariablement	cale P′, invariablement
76	17e	... et de E^n	... et de E_n
82	3e	$L_h = 45\, d.d\, 5$	$L_h = 45\, b.d\, 5$
90	11e	de 32 sous 110 volts	de 32^b sous 110 volts
93	18e	ngle $\widehat{XOY}$	l'angle $\widehat{XOY}$
94	16e	(fig. 50 ; β′)	(fig. 51 ; β′)
97	3e	8a % ($100^{b.h}$)	83 % ($100^{b.h}$)
102	31e	lampe de 5 ^{d}	lampe de $5^{b.d}$
109	avant-dernière	variation de $\frac{\Delta L^h}{\Delta E}$	variation de $\frac{\Delta L_h}{\Delta E}$

1. Indices, accents, virgules, chiffres tombés au cours du tirage.

Pages.	Lignes.	Au lieu de :	Lire :
111	av. dernière (tabl.)	$3\ 20 \times 10^{-7} \times E^{3,74}$	$3,20 \times 10^{-7} \times E^{3,74}$
135	16e	$L_s = \frac{1}{2} L_h \times \frac{1}{4} L_m$	$L_s = \frac{1}{2} L_h + \frac{1}{4} L_m$
143	26e	flux lumieux	flux lumineux
146	18e	; I — inten-	; $I =$ inten-
180	20e	α du 180)	α du § 180)
180	avant-dernière	: $\frac{2}{17} = 0,12$	$\frac{2}{17} = 0,12$
183	12e	$i_a = \frac{8}{5}; = 1,6\ i_b = \frac{6}{5}$	$i_a = \frac{8}{5} = 1,6;\ i_b = \frac{6}{5}$
209	30e	, et à *a* (—),	, et à **a** (—),
214	2e; 1re col. (tableau)	,5	1,5
217	1re (tableau)	i^n (ampères)	i_n (ampères)
220	30e	au condensateur C	au condensateur C′

SOCIÉTÉ GÉNÉRALE D'IMPRIMERIE ET D'ÉDITION
RUE CASSETTE, 17, PARIS. — S. — 4-25




F.J.B.&Co.
NOV. 1939
BINDERS